

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Detekce objektů v pracovním prostoru  
průmyslového robota**

**The Object Detection in Working Area  
of Industry Robot**

Liberec 2010

Bc. Tomáš Žabčík

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: X2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3902T005 – Automatické řízení a inženýrská informatika

## **Detekce objektů v pracovním prostoru průmyslového robota**

## **The Object Detection in Working Area of Industry Robot**

### **Diplomová práce**

Autor: **Bc. Tomáš Žabčík**

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Holada, Ph.D.

Konzultant: Ing. Josef Chaloupka, Ph.D.

V Liberci 21. 5. 2010

**zde bude originál zadání práce**

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum .....

Podpis .....

## **Poděkování**

Především bych chtěl poděkovat **Ing. Miroslavu Holadovi, Ph.D.** za odborné vedení, cenné rady a poskytnuté informace, které napomohly ke vzniku této diplomové práce.

Zároveň bych chtěl poděkovat mé rodině za morální a materiální podporu, která mi umožnila studium na vysoké škole.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá problematikou zabezpečení pracovního prostoru průmyslového robota pomocí vhodně umístěným párem kamer. Pro detekci objektů vnikajících do pracovního prostoru robota je využito algoritmů stereovidění. V teoretické části práce jsou popsány metody kalibrování kamer a popsány postupy pro stereovizi. V praktické části je popsána vlastní realizace kamerového systému. Výsledkem práce je softwarová aplikace.

## **Klíčová slova**

detekce překážky, pracovní prostor robota, stereovidění, kalibrace kamery

## **Abstract**

This diploma thesis addresses a branch about the guarding industry robot workspace. The guarding is solved by a pair of appropriately located cameras. To detect objects penetrating into the robot working area, algorithms of the stereovision are used. The theoretical section describes methods to calibrating camera and the procedures for stereovision. The practical part describes the implementation of its own camera system. The final product of this thesis is a software application.

## **Keywords**

obstacle detection, robot workspace, stereo vision, camera calibration

# Obsah

Úvod.....	10
1 Teoretická část .....	11
1.1 Kalibrace kamery .....	11
1.1.1 Model projektivní kamery .....	11
1.1.2 Distorze objektivu .....	13
1.1.3 Chyba diskretizace .....	14
1.1.4 Metody kalibrace .....	14
1.2 Počítačové stereovidení.....	16
1.2.1 Triangulace .....	16
1.2.2 Disparita, mapa disparity .....	17
1.2.3 Epipolární geometrie.....	18
1.2.4 Rektifikace .....	19
1.2.5 Stereo kalibrace.....	21
1.2.6 3D reprojekce, mapa hloubky .....	21
1.2.7 Stereokorespondence .....	22
2 Praktická část .....	23
2.1 Volba hardware .....	23
2.2 Počítačové stereovidení.....	24
2.2.1 Sestavení kamerové aparatury .....	24
2.2.2 Kalibrace kamerové aparatury .....	25
2.2.3 Stereokorespondence .....	26
2.2.4 Grafické vyjádření mapy disparity .....	27
2.2.5 Reprojekce 3D prostoru .....	28
2.3 Detekce objektů v prostoru .....	29
2.3.1 Vymezení pracovního prostoru robota .....	29
2.3.2 Hlídané oblasti .....	30



2.3.3	Detekce překážky v hlídané oblasti .....	31
2.4	Snímání stereo páru snímků z kamer .....	33
2.5	Zpracování stereo páru 2D snímků .....	34
3	Testování kamerového systému .....	35
	Závěr .....	38
	Seznam použité literatury .....	39
	Příloha A – GUI navržené aplikace .....	40
	Příloha B – Popis GUI navržené aplikace .....	41
	Příloha C – Návod na používání aplikace .....	42

## Seznam použitých obrázků

Obrázek 1: Dírková komora .....	11
Obrázek 2: Změna souřadného systému .....	12
Obrázek 3: Radiální zkreslení.....	13
Obrázek 4: Tangenciální zkreslení .....	13
Obrázek 5: Chyba diskretizace .....	14
Obrázek 6: Kalibrace pomocí 2D objektu .....	15
Obrázek 7: a) Kalibrační šachovnice, b) Referenční body pro kalibraci .....	15
Obrázek 8: Triangulace.....	16
Obrázek 9: Vztah mezi disparitou a vzdáleností .....	17
Obrázek 10: Měnicí se rozlišení disparity .....	17
Obrázek 11: Epipolární geometrie .....	18
Obrázek 12: Nerektilifikovaný stereo pár snímků .....	19
Obrázek 13: Rektifikovaný stereo pár snímků .....	20
Obrázek 14: Transformace obou snímků do shodné roviny .....	20
Obrázek 15: Creative WebCam Live!Cam Socialize HD .....	23
Obrázek 16: a)Kamerová aparatura, b)Určení dominantní kamery.....	24
Obrázek 17: Softwarová podpora pro sestavení kamerové aparatury .....	24
Obrázek 18: Kalibrace kamer pomocí šachovnice (v různých rovinách).....	25
Obrázek 19: GUI – mapa disparity .....	27
Obrázek 20: GUI – kurzory, korekce jednotek .....	28
Obrázek 21: a) Robotická buňka, b) Virtuální bezpečnostní klec .....	29
Obrázek 22: Kvádr v prostoru světa .....	30
Obrázek 23: GUI – zadávání hlídaných oblastí .....	30
Obrázek 24: Detekce překážky ve virtuální kleci .....	31
Obrázek 25: GUI – detekce překážky .....	32
Obrázek 26: Vývojový diagram synchronizace snímků .....	33
Obrázek 27 Vývojový diagram zpracování stereo páru snímků.....	34
Obrázek 28: Logitech QuickCam Orbit MP .....	35
Obrázek 29: Testování systému v laboratoři inteligentních robotů .....	36
Obrázek 30: GUI – mapa disparity při použití strukturovaného světla .....	37
Obrázek 31: GUI – zjištění polohy bodu v prostoru.....	37

# Úvod

V průmyslu se můžeme setkat s pracovišti, kde není vhodné pro ochranu pracovního prostoru robota využívat konvenční robotické klece. Zajistit pracovní prostor robota tak, aby do něj nevnikl cizí objekt, bez robotické klece přímo nelze. Objekty vnikající do toho prostoru můžeme detekovat. Při detekci vniku objektu bude řídící jednotka informována o narušení bezpečnostního prostoru a robota zastaví. Předejde se tak kolizi.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou detekce překážky v pracovním prostoru průmyslového robota využitím dvou webových kamer. Práce je členěna do dvou hlavních částí, na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části je čtenář seznámen s kalibrací kamer a principy počítačového stereovidění. V kapitole kalibrace kamer je postupně rozšířen model kamery tak, aby bylo možné kamery používat pro počítačové zpracování. Kapitola počítačového stereovidění popisuje v oddělených kapitolách způsob vyhodnocení hloubkové informace za pomoci dvou vzájemně posunutých kamer.

Praktická část, která se zabývá vlastním návrhem aplikace, je členěna do tří částí. V první části je věnována pozornost výběru vhodných kamer a navržené metodě pro optimální sestavení kamerové aparatury. Následně je zmíněna stereokalibrace použitých kamer a rektifikace snímků. Dále je odůvodněn výběr vhodného algoritmu pro hledání stereokorespondence. Po nalezení stereokorespondence a ze získané matice disparity je popsána navržená vizualizace mapy disparity. Dále je popsán navržený způsob získávání informace o poloze objektu v prostoru světa. Ve druhé části je navrhnout způsob ochrany pracovního prostoru robota. Jsou navrženy elementární oblasti, pomocí kterých lze následně sledovat libovolně složitý prostor. Je popsáno uživatelské zadávání hlídaných oblastí v GUI aplikace a vyhodnocení detekce kolize hlídané oblasti s objektem. V poslední části je věnována pozornost problematice synchronizace kamer a postupu zpracování stereo páru snímků pro vyhodnocení informace o prostoru snímané scény.

# 1 Teoretická část

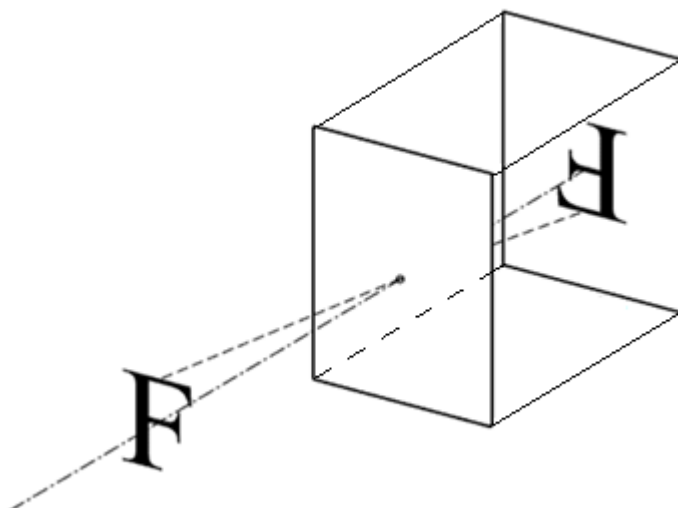
## 1.1 Kalibrace kamery

Práce s kamerami v počítačovém vidění je spojena se znalostí způsobu vzniku snímků. Bez této znalosti nejsme schopni získat metrické informace ze snímané scény.

Abychom mohli kameru kalibrovat, je zapotřebí vzít v úvahu její matematický model, který nám bude skutečnou kameru aproximovat.

### 1.1.1 Model projektivní kamery

Nejjednodušší používaný model kamery je tzv. model dírkové komory. Tento model i přes svoji jednoduchost dostatečně přesně aproximuje chování reálné kamery.



Obrázek 1: Dírková komora

Projekce u dírkové kamery je popsána vztahem

$$\mathbf{x} = \mathbf{P}\mathbf{X}, \quad (1)$$

kde  $\mathbf{x}$  je vektor určující souřadnice bodu ve 2D snímku,  $\mathbf{P}$  je projekční matice a  $\mathbf{X}$  je vektor určující souřadnice bodu v 3D světě.

**Projekční matici  $\mathbf{P}$**  lze rozepsat na dvě matice.

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}[\mathbf{R}|\mathbf{t}], \quad (2)$$

kde matice  $\mathbf{K}$  popisuje tzv. **vnitřní parametry** kamery a matice  $[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$  popisuje tzv. **vnější parametry** kamery.

## Vnitřní parametry kamery

Vnitřní parametry kamery popisují geometrii kamery. Jsou nezbytné pro vyjádření vztahu mezi pixelovými souřadnicemi a kamerovým systémem.

Matice vnitřních parametrů  $\mathbf{K}$  obsahuje 5 parametrů.

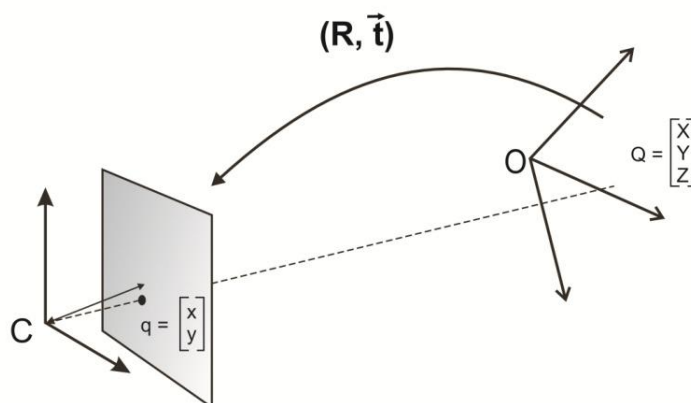
$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha_x & s_{xy} & c_x \\ 0 & \alpha_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

kde  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$  matematicky vyjadřují středové promítání se započtenou změnou měřítka ve směru, parametry  $c_x$ ,  $c_y$  vyjadřují pozici tzv. hlavního bodu kamery a parametr  $s_{xy}$  určuje zkosení x-ové osy k y-ové ose.

Parametr zkosení  $s_{xy}$  bývá u současných kamer velmi malý. Dle literatury se u většiny modelů tento parametr zanedbává.

## Vnější parametry kamery

Vnější parametry kamery definují polohu a orientaci souřadného systému kamery vzhledem ke známému zobecněnému souřadnému systému.



Obrázek 2: Změna souřadného systému

Matice  $[\mathbf{R}|\mathbf{t}]$  lze rozepsat na matici rozměru 4 x 3:

$$[\mathbf{R}|\mathbf{t}] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

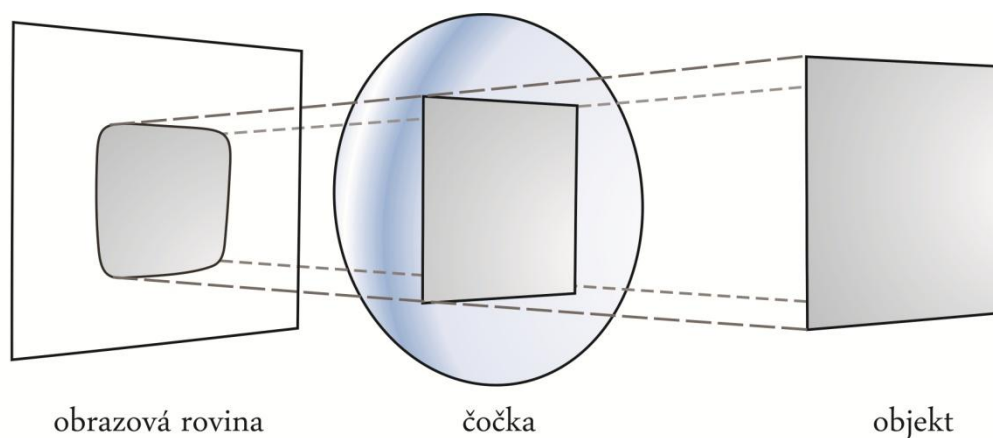
kde parametry  $\mathbf{t}$  představují translaci souřadného systému a parametry  $\mathbf{r}$  představují rotaci souřadného systému.

### 1.1.2 Distorze objektivu

Obraz po průchodu čočkou bývá většinou zkreslen. To je způsobeno nedokonalostí tvaru čočky či špatným uchycením snímacího čipu.

Uvažujme dvě základní zkreslení:

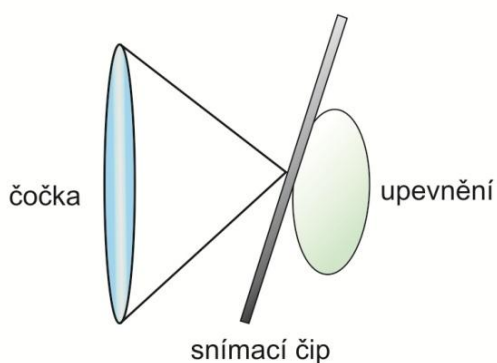
- Radiální zkreslení



Obrázek 3: Radiální zkreslení

Čočka zpravidla má kulovitý tvar. Zobrazovací paprsky po průchodu čočkou se odklánějí od přímky. Tímto se objekt s rovnými hranami po průchodu čočkou jeví jako předmět s hranami zaoblenými.

- Tangenciální zkreslení

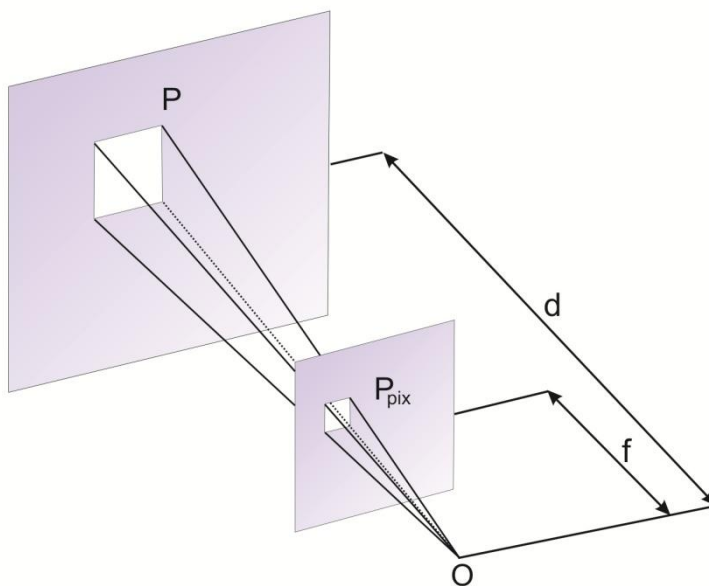


Obrázek 4: Tangenciální zkreslení

Uložení snímacích čipů nemusí být vždy dokonalé. Často dochází k tomu, že čip není připevněn tak, aby byl kolmý na optickou osu kamery.

### 1.1.3 Chyba diskretizace

Kamera zachytává obraz z afinního prostoru světa, který můžeme považovat za spojitý. Naopak snímací čip kamery je nespojitý a obsahuje konečný počet snímacích buněk. To má za důsledek to, že se nekonečná množina bodů afinního prostoru světa promítne do jednoho pixelu (viz obr. 5).



Obrázek 5: Chyba diskretizace

Chyba diskretizace roste se vzdáleností od roviny čipu a se vzdáleností od optického středu snímku.

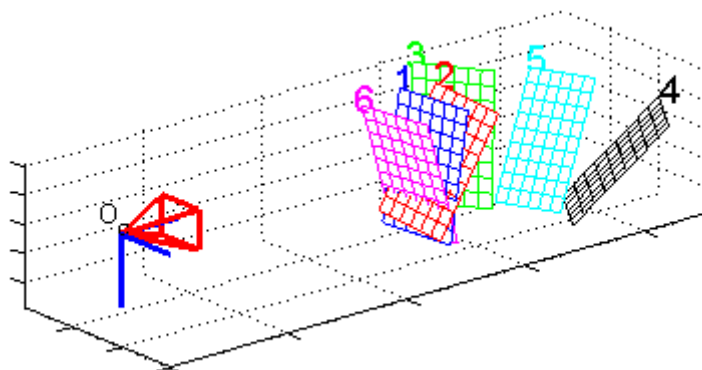
### 1.1.4 Metody kalibrace

Existuje řada kalibračních metod. Metody jsou vždy závislé na konkrétním matematickém modelu, který je použit k aproximaci chování kamery.

Kalibrace lze dělit na kalibraci geometrickou a na kalibraci radiometrickou. Radiometrická kalibrace vychází z deformace jasové charakteristiky scény (barva, jas, světlost). Pro tuto práci je podstatná geometrická kalibrace kamery, která zjišťuje geometrický převod scény do snímku kamery.

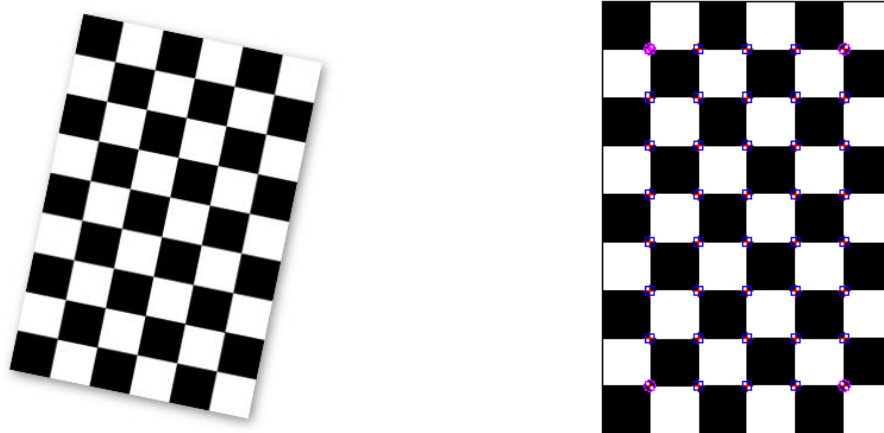
Metody geometrické kalibrace se dělí na metody, kde je zapotřebí znát geometrii kalibračního předmětu, na metody které vycházejí ze známé scény a na metody samokalibrační.

Kalibrace pomocí známého objektu lze provést pomocí 3D objektu, nebo pomocí 2D objektu, který musí být nasnímán v různých objektových rovinách.



Obrázek 6: Kalibrace pomocí 2D objektu (Matlab, ToolBox: Calib)

Kalibrační objekt musí mít na sobě dobře strojově rozpoznatelné referenční body. Referenčními body mohou být rohy čtverců (viz obr. 7b), průsečíky úseček, těžiště kruhů, atd.



Obrázek 7: a) Kalibrační šachovnice, b) Referenční body pro kalibraci

Snímky s kalibračním objektem určené pro kalibraci je vhodné před vlastním zpracováním kalibrační metodou upravit algoritmy pro zpracování obrazu, zejména prahováním a filtrováním.

Prahováním se získá binární obraz. Je-li kalibrační objekt vhodně osvětlen, lze přímo extrahovat kalibrační body. U prahování je nezbytné vhodné osvětlení kalibračního objektu. Při použití nevhodného osvětlení, či nevhodně zvoleného prahu obraz ztrácí informaci o kontrolních bodech a kalibrační snímek je nepoužitelný.

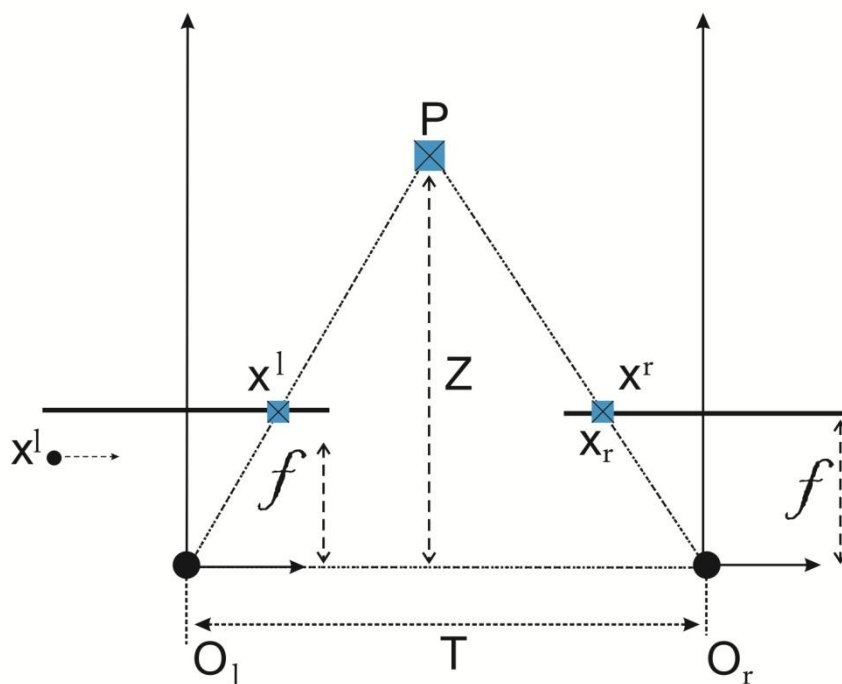


## 1.2 Počítačové stereovidění

### 1.2.1 Triangulace

Předpokládejme dva obrazy z kamer zobrazující stejnou scénu ze dvou různých míst. Známe vzájemnou polohu těchto dvou míst i orientaci kamer. Obrazové roviny jsou koplanární a navíc i řádkově porovnatelné (viz obr. 8). Potom u objektů, které jsou zobrazeny v obou kamerách, lze vypočítat jejich hloubku.

Výpočet hloubky se pak stává trigonometrickou úlohou – triangulace. Sestrojí se pomyslný trojúhelník, jehož jedna strana je strana již známého jiného trojúhelníku s dvěma koncovými referenčními body a třetím bodem je místo, jehož souřadnice se zjišťuje.



Obrázek 8: Triangulace

Uvažujeme-li, že obě kamery mají stejnou ohniskovou vzdálenost, pak lze vyjádřit vzdálenost objektu pomocí vztahu:

$$\frac{T - (x^l - x^r)}{Z - f} = \frac{T}{Z} \Rightarrow Z = \frac{fT}{x^l - x^r}, \quad (5)$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost,  $T$  je vzájemná vzdálenost kamer v horizontálním směru,  $x^l$ ,  $x^r$  reprezentují souřadnice korespondujících pixelů ve snímcích kamer a  $O_l$ ,  $O_r$  jsou optické středy kamer (viz obr. 8).

### 1.2.2 Disparita, mapa disparity

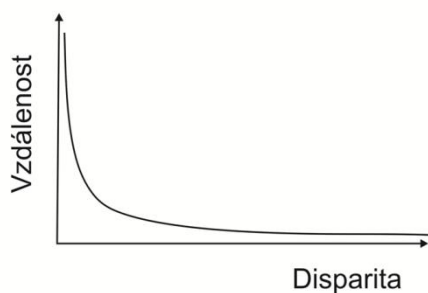
V předchozí kapitole byl uveden výpočet hloubky objektu pomocí triangulace. Triangulace vycházela ze znalosti vzájemného posunutí korespondujících pixelů ve stereo páru snímků. Toto posunutí je odborně označováno termínem **disparita**.

Disparita  $d$  se vypočte dle vztahu:

$$d = x^l - x^r, \quad (6)$$

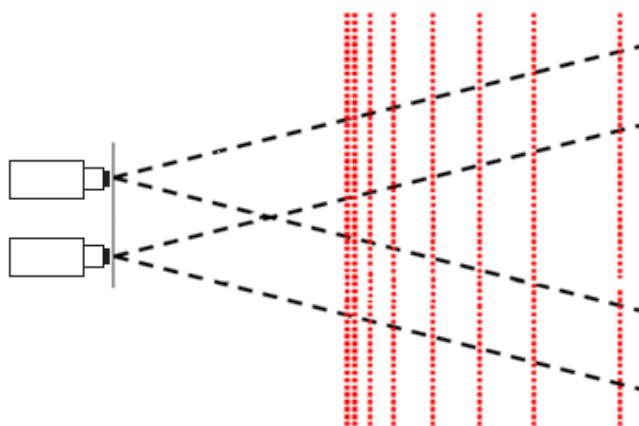
kde  $x^l$  je pozice pixelu v levém snímku a  $x^r$  je pozice korespondujícího pixelu v pravém snímku.

Disparita je nepřímo úměrná vzdálenosti (viz obr. 9). Je-li disparita malá, pak malá změna disparity je způsobena velkou změnou vzdálenosti. Naopak, když je disparita velká, pak malá změna disparity je způsobena malou změnou vzdálenosti.



Obrázek 9: Vztah mezi disparitou a vzdáleností

Algoritmy stereovidení mají vysoké rozlišení blízko kamer. Naopak nízké rozlišení u vzdálených objektů (viz obr. 10).



Obrázek 10: Mění se rozlišení disparity

### 1.2.3 Epipolární geometrie

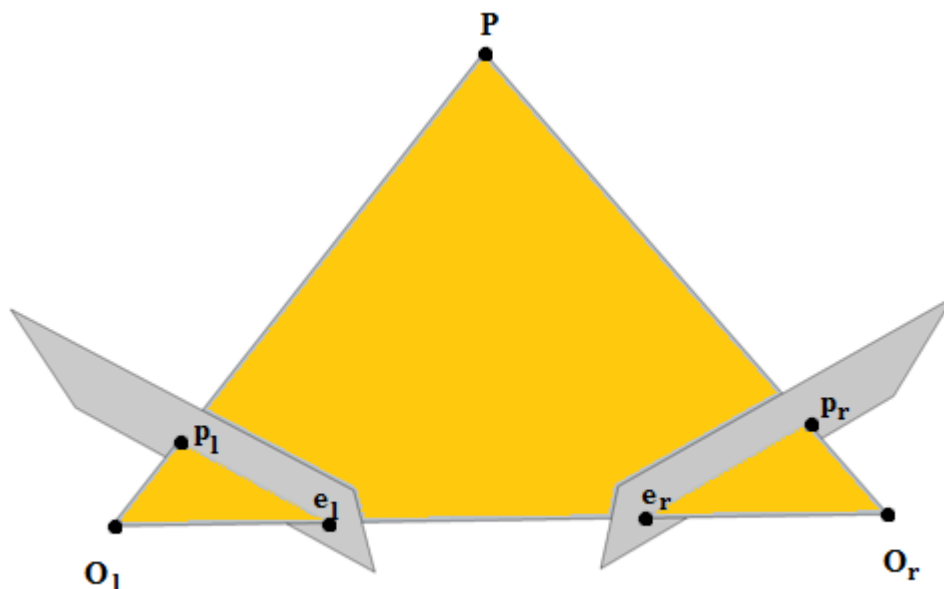
Dosud jsme uvažovali, že pozice korespondujících pixelů je známa. Ve skutečnosti tyto stereokorespondence musíme najít. Hledání stereokorespondence je důležitým úkolem stereovidění, který vzhledem k výpočetnímu času trvá nejdéle.

Existují algoritmy, které hledají korespondenci v celém snímku. To je však neefektivní způsob.

Uvažujme-li epipolární geometrii [6], tedy vnitřní projektivní geometrii mezi snímky, lze zefektivnit hledání stereokorespondence z původního prohledávání dvojdimenzionálního snímku na prohledávání jednodimenzionální úsečky.

Epipolární geometrie není závislá na konkrétní scéně. Závislá je pouze na vnitřních parametrech kamer a na jejich vzájemné pozici.

Mějme trojrozměrný bod  $P$ , který je promítnut do obrazových rovin obou kamer. Obrazové roviny kamer obecně nejsou koplanární a jsou vzájemně posunuty. Cílem je vymezit oblast ve snímku druhé kamery, do které může být promítnut bod  $P$  za předpokladu, že v první kameře je umístění promítnutého bodu  $P$  známo.



Obrázek 11: Epipolární geometrie

Body, tzv. **epipóly**  $e_1$ ,  $e_r$  jsou pevně dány. Jsou to body průtnutí přímky procházející **optickými středy kamer**  $O_1$ ,  $O_r$  s obrazovými rovinami kamer. Body  $p_1$ ,  $p_r$  reprezentují **promítnutí bodu  $P$**  do obrazových rovin kamer.

Bude-li bod  $P$  měnit svoji pozici tak, že ve snímku z levé kamery bude reprezentován stále stejným pixelem, pak korespondující bod ve snímku pravé kamery se může nacházet jedině na přímce, která je definována vektorem  $(\mathbf{e}_r, \mathbf{p}_r)$ , tzv. epipolární přímkou.

Uvažujme o tzv. **esenciální matici**  $\mathbf{E}$ , která definuje vztah mezi korespondujícími pixely:

$$\mathbf{p}_l^T \mathbf{E} \mathbf{p}_r = 0. \quad (7)$$

Pokud navíc bereme v úvahu vnitřní parametry kamer, vznikne rozšířením esenciální matice tzv. **fundamentální matice**  $\mathbf{F}$ :

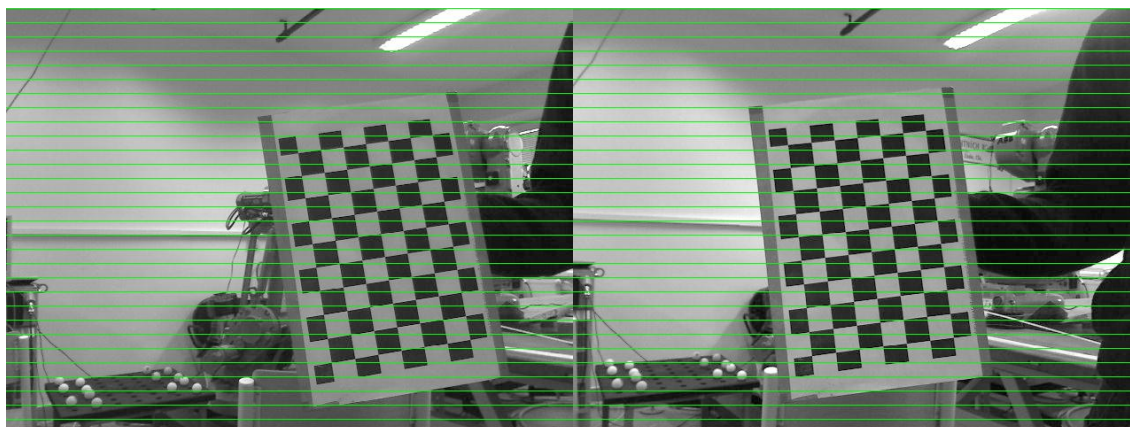
$$\mathbf{F} = (\mathbf{K}_r^{-1})^T \mathbf{E} \mathbf{K}_l^{-1}. \quad (8)$$

Fundamentální matice geometricky mapuje snímek pořízený z jedné kamery na svazek epipolárních přímek procházejících epipólem druhého snímku.

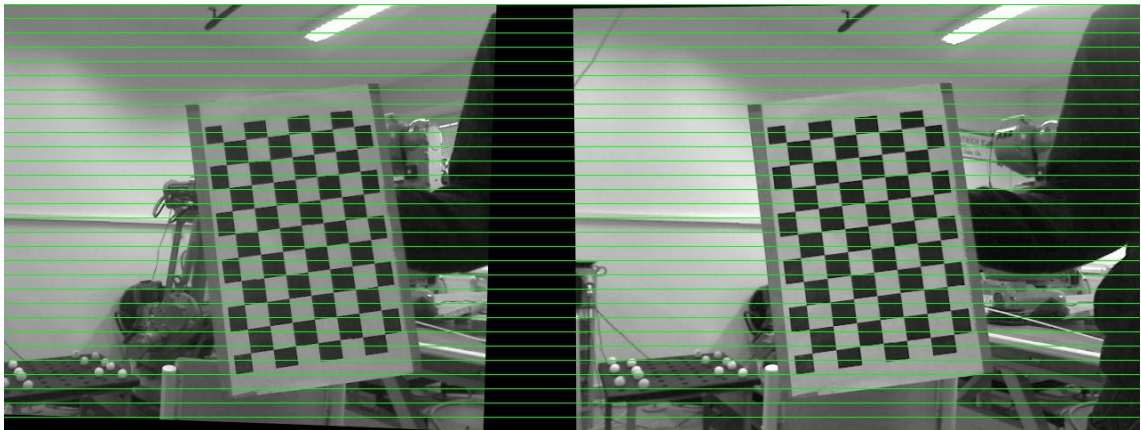
#### 1.2.4 Rektifikace

V předchozí kapitole bylo pomocí epipolární geometrie zefektivněno prohledávání obrazu. Místo 2D plochy se prohledává 1D úsečka. Tato úsečka však může mít libovolný sklon.

Dalším zefektivněním je tzv. **rektifikace**. Ta převede hledání stereokorespondence z obecné přímky na prohledávání řádku, tedy po přímce s nulovým sklonem. Toho je docíleno matematickou transformací snímků tak, aby po transformaci byly epipóly umístěny v nekonečnu.



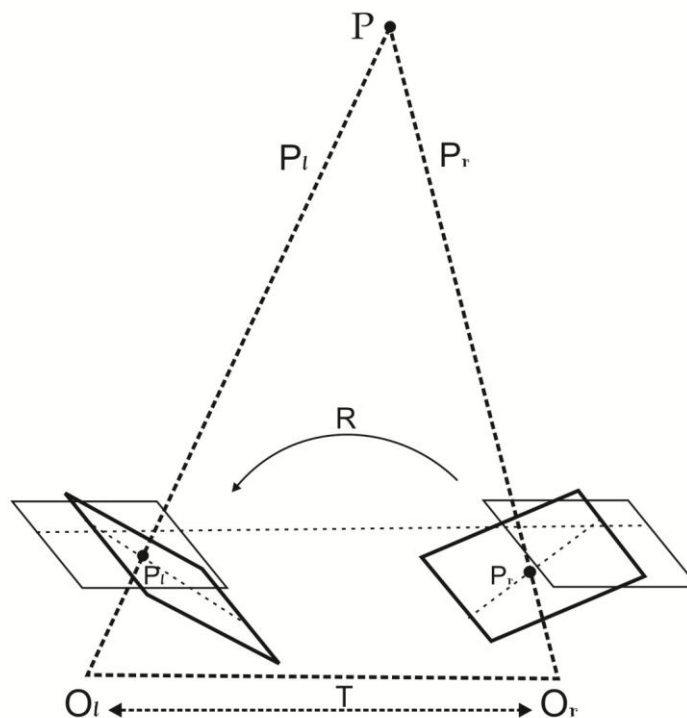
Obrázek 12: Nerektifikovaný stereo pár snímků



Obrázek 13: Rektifikovaný stereo pár snímků

Uvažujeme-li metodu *Bouguet's* [1] pro rektifikaci, lze získat minimální zkreslení snímků matematickou transformací. Toho dosáhneme tak, že snímky rotují o stejný úhel tak, aby ve výsledku byly koplanární. Tato metoda je výhodná zejména z důvodu, že každá matematická transformace deformuje obraz. Rotování obou obrazů o poloviční úhel se minimalizuje chyba transformací (viz obr. 14).

Ve speciálním případě, kdy obě kamery mají průsečík v nekonečnu, rektifikace není nutná.



Obrázek 14: Transformace obou snímků do shodné roviny

### 1.2.5 Stereo kalibrace

Stereo kalibrace znamená kalibrování kamer pomocí stereo páru snímků, ve kterých se vyskytuje kalibrační objekt. Pomocí této kalibrace jsme schopni určit nejen vnitřní parametry kamery, ale i vzájemnou polohu kamer, která je nezbytnou informací pro použití *Bouguet's* algoritmu [1].

Stereo kalibraci můžeme provést pomocí stejného kalibračního objektu jako bylo u kalibrace jedné kamery – 2D šachovnice.

### 1.2.6 3D reprojekce, mapa hloubky

Ze znalosti souřadnic pixelu z rektifikovaného snímku z dominantní kamery a z vypočtené disparity vztažené k pixelu je možné zjistit reprojekci polohu bodu v prostoru světa vztahem:

$$Q \begin{bmatrix} x \\ y \\ d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix}, \quad (9)$$

kde  $x, y$  jsou souřadnice pixelu,  $d$  je vypočtená disparita,  $(X/W, Y/W, Z/W)^T$  jsou souřadnice bodu v prostoru,  $W$  je neznámá konstanta změny měřítka a  $Q$  je matice reprojekce.

Matice reprojekce při rektifikaci *Bouguet's* algoritmem [1] je definována vztahem:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_{xl} \\ 0 & 1 & 0 & -c_{yl} \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & -1/T_x & (c_{xl} - c_{xr})/T_x \end{bmatrix}, \quad (10)$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost kamer,  $T_x$  je vzdálenost kamer vůči sobě v horizontálním směru,  $c_{xl}$  je pozice hlavního bodu dominantní kamery v horizontálním směru,  $c_{yl}$  je pozice hlavního bodu dominantní kamery ve vertikálním směru,  $c_{xr}$  je pozice hlavního bodu nedominantní kamery v horizontálním směru.

### 1.2.7 Stereokorespondence

V této kapitole jsme pomocí rektifikace, resp. epipolární geometrie schopni omezit hledání stereokorespondence na prohledávání řádku. Nyní již můžeme popsat hledání korespondence mezi pixely.

Cílem je najít mezi dvěma dvojdimenzionálními obrazy z kamer ty pixely, které reprezentují jeden bod v třídimenzionálním prostoru světa.

Existuje mnoho metod hledání stereo-korespondence. V této práci je vybrána metoda taková, která je z hlediska výpočetního času nejméně náročná – metoda blokového párování.

**Metoda blokového párování**, navržená *Kurt Konolige* [1]

Tato metoda, hledá stereokorespondenci pomocí posuvného výpočetního okna. Dobrých výsledků je dosaženo u snímků, které zachycují scény s vysokou texturou. Naopak při nízké textuře scény metoda dokáže najít jen malý počet korespondencí.

Algoritmus blokového párování pracuje ve třech fázích.

V prvním fázi se vstupní obrazy předzpracovávají. Předzpracování se provádí pomocí pracovního okna dané velikosti. Nejčastěji pro předzpracování je používán průměrovací filtr, který odstraní šum v obrazech.

Ve druhé fázi se hledá vlastní stereokorespondence kolem horizontálních epipolárních přímek použitím **posuvného SAD** (suma absolutních diferencí) **okna**.

V poslední fázi se diskvalifikují neplatné korespondenční shody. Neplatné shody se definují dle konkrétních parametrů scény, jako je např. minimální hloubka objektu v prostoru, jedinečnost textury, atd.

## 2 Praktická část

### 2.1 Volba hardware

Dnešní trh nabízí převážně dva typy webových kamer, které jsou cenově srovnatelné. Jednak kamery obsahující snímače založené na čipu CCD, nebo založené na čipu CMOS. Z hlediska spotřeby elektrické energie se jeví jako výhodnější technologie na bázi CCD. Starší technologie CMOS se však i přes svoje větší nároky na energii jeví pro naši aplikaci výhodnější. Vykazuje menší šum v nasnímaném obraze.

Důležitým požadavkem na kameru vzhledem k algoritmům stereovidění založených na kalibrovaných kamerách je také, aby měla fixní ohniskovou vzdálenost, či aby se dala manuálně měnit. Naopak je nežádoucí, aby se ohnisková vzdálenost kamery měnila v závislosti na snímané scéně.

#### Použité kamery

Po prozkoumání trhu s webovými kamerami byla vybrána dvojice kamer od výrobce Creative Labs. Kamery jsou založeny na čipu technologie CMOS a ohnisková vzdálenost je konstantní.



Obrázek 15: Creative WebCam Live!Cam Socialize HD

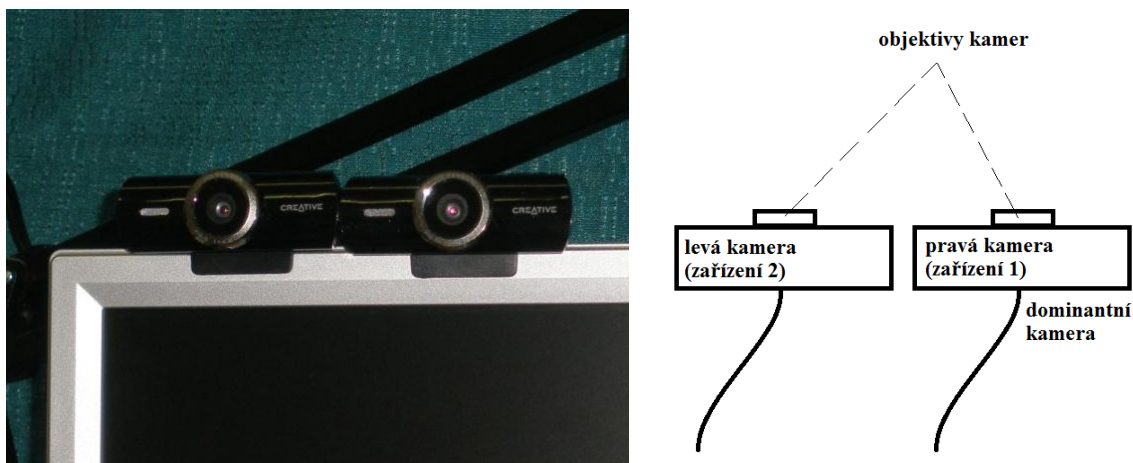
Název produktu:	Creative WebCam Live!Cam Socialize HD
Obrazový snímač:	HD CMOS
Ohnisková vzdálenost:	4,21 mm (pevná)
Rozlišení videa:	až 1280 x 720 pixelů @ 30fps
Rozlišení fotoaparátu:	až 5.7 MP s interpolací
Délka kabelu:	1,7 m
Cena včetně DPH:	1.402,- Kč ( <a href="http://www.alcomp.cz">http://www.alcomp.cz</a> , ke dni 3. 5. 2010)



## 2.2 Počítačové stereovidění

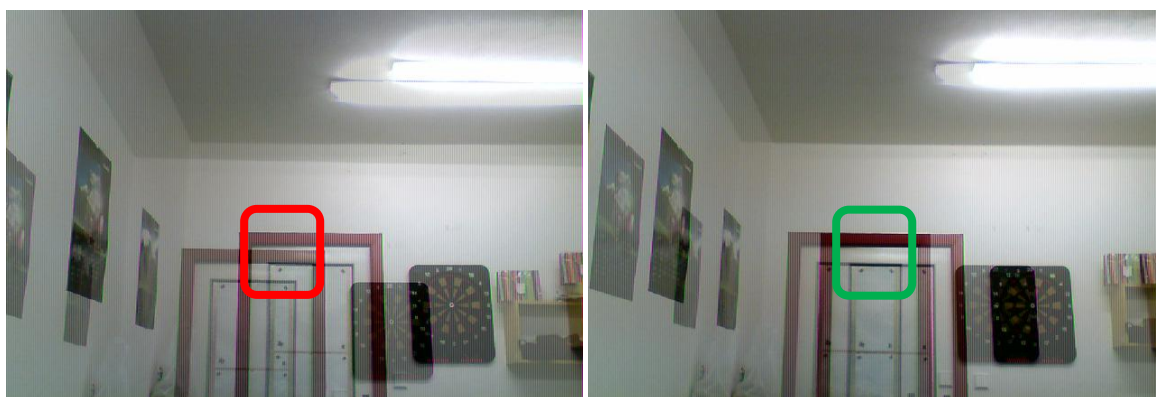
### 2.2.1 Sestavení kamerové aparatury

Pro účely počítačového stereovidění předpokládáme relativní pozici kamer vůči sobě podobnou, jako je relativní pozice očí u člověka. Kamery je vhodné umístit tak, aby byly ve stejné horizontální ose. Jedna kamera se volí jako dominantní. K této kameře budou pak v práci vztahovány veškeré výsledky stereovidění. Na obr. 16b lze vidět volbu dominantní kamery, která je uvažována v celé práci.



Obrázek 16: a)Kamerová aparatura, b)Určení dominantní kamery

Informaci o hloubce lze vypočítat pouze v těch oblastech, které jsou současně promítány do obou kamer. Běžným upevněním kamer nemáme zajištěno, že kamery budou sledovat stejnou scénu. Z toho důvodu je navržena softwarová podpora, pomocí které lze kamerovou aparaturu sestavit tak, aby bylo mezi snímky z kamer pouze horizontální posunutí.



Obrázek 17: Softwarová podpora pro sestavení kamerové aparatury  
a) neoptimální volba, b) optimální volba

Softwarová podpora spočívá v prolínání snímků z levé a pravé kamery (viz obr. 17). Pomocí takto seřízených kamer je dosahováno nejlepších výsledků algoritmů stereovidení.

Stanovení korespondujících bodů je snazší při malé vzdálenosti mezi kamerami. Při větším odstupu kamer je hledání korespondence obtížnější.

Přesnost rekonstruovaného 3D objektu je nízká, když rozestup kamer a úhel jejich optických os je malý. S rostoucí vzdáleností a úhlem se přesnost zvyší.

### 2.2.2 Kalibrace kamerové aparatury

Použité kamery nejsou určeny pro měřické účely. Abychom kamery mohli použít k těmto účelům, je nutné znát způsob, jak kamery obraz vytvářejí. U drahých kamer jsou parametry známy. My je musíme odhadnout pomocí metody – kalibrace.

Kalibrace kamer je v práci prováděna pomocí algoritmů počítačového frameworku OpenCV. Kalibračním předmětem byla zvolena 2D šachovnice o známém počtu políček (10 x 7). Šachovnice musí být pro účely kalibrace sejmuta nejméně dvakrát v různých rovinách (viz obr. 18). Kalibrace s využitím knihoven OpenCV využívá dírkový model kamery, který v sobě zohledňuje distorzi čočky.



Obrázek 18: Kalibrace kamer pomocí šachovnice (v různých rovinách)

Výstupem kalibrace jsou matice vnitřních a vnějších parametrů kamer. Pomocí těchto parametrů je provedena rektifikace obrazů tak, aby snímky byly řádkově porovnatelné.

## Vnitřní parametry kamer „Creative“ zjištěné stereokalibrací algoritmy OpenCV

- Kamera 1 (dominantní):  
fx = 820.0676159070843600  
fy = 821.5595508978332200  
cx = 321.5109619648718500  
cy = 245.7807990679239700
- Kamera 2:  
fx = 820.0676159070843600  
fy = 821.5595508978332200  
cx = 321.0248831738605300  
cy = 236.7886402904128700

Stereokalibrace je nastavena tak, aby u obou kamer byla uvažována stejná ohnisková vzdálenost.

Před samotnou stereokalibrací je odstraněno zkreslení způsobené distorzí objektivu. Parametry distorze jsou pak uvažovány při remapování snímků u rektifikace.

### 2.2.3 Stereokorespondence

Jelikož aplikace musí běžet v reálném čase je vybrán algoritmus stereovidění takový, který hledá stereokorespondenci po blocích.

V prvním kroku je užito normalizování snímků pomocí průměrovacího filtru s pracovním oknem 21 x 21 pixelů.

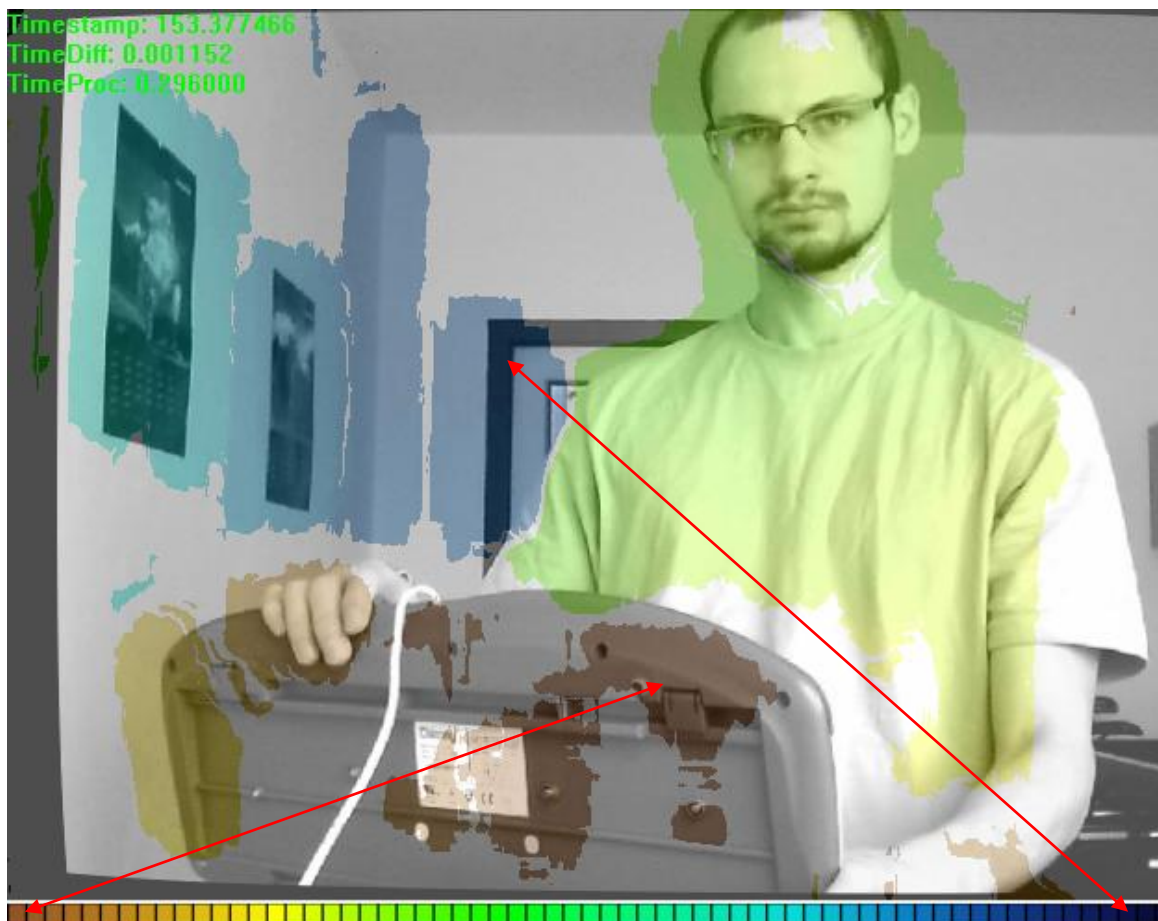
Ve druhém kroku se provádí samotné hledání korespondence v normalizovaných snímcích. Optimální velikost pracovního okna byla zjištěna experimentálně. Nejlepších výsledků, při rozlišení snímků 640 x 480 pixelů, bylo dosaženo, když posuvné okno bylo dlouhé 41 pixelů.

V poslední části jsou vyřazeny chybné korespondence.

Problematika hledání stereokorespondencí pomocí blokového algoritmu, posuvného SAD okna je kompletně řešena frameworkem OpenCV funkcí `cvFindStereoCorrespondenceBM()`, kde vstupními parametry jsou rektifikované snímky s báze pravidel pro hledání stereokorespondence.




## 2.2.4 Grafické vyjádření mapy disparity

Mapa disparity je tvořena maticí čísel. Pro grafické zobrazení byla mapa disparity kvantována do 64 úrovní, aby se dala zobrazit pomocí navržené barevné škály.



Obrázek 19: GUI – mapa disparity

V aplikaci byly navrženy celkově 3 barevné škály:

- Šedo-tónová (volitelný počet odstínů) 
- Modro-tónová (volitelný počet odstínů) 
- Barevná (64 barev) 

Levou částí barevné škály jsou pokryty předměty, které jsou umístěny nejbližší. Modrou barvou jsou naopak pokryty předměty nejvzdálenější (viz obr. 19).

Barvy z barevné škály jsou příslušně nanášeny na černobílý rektifikovaný obraz z dominantní kamery.

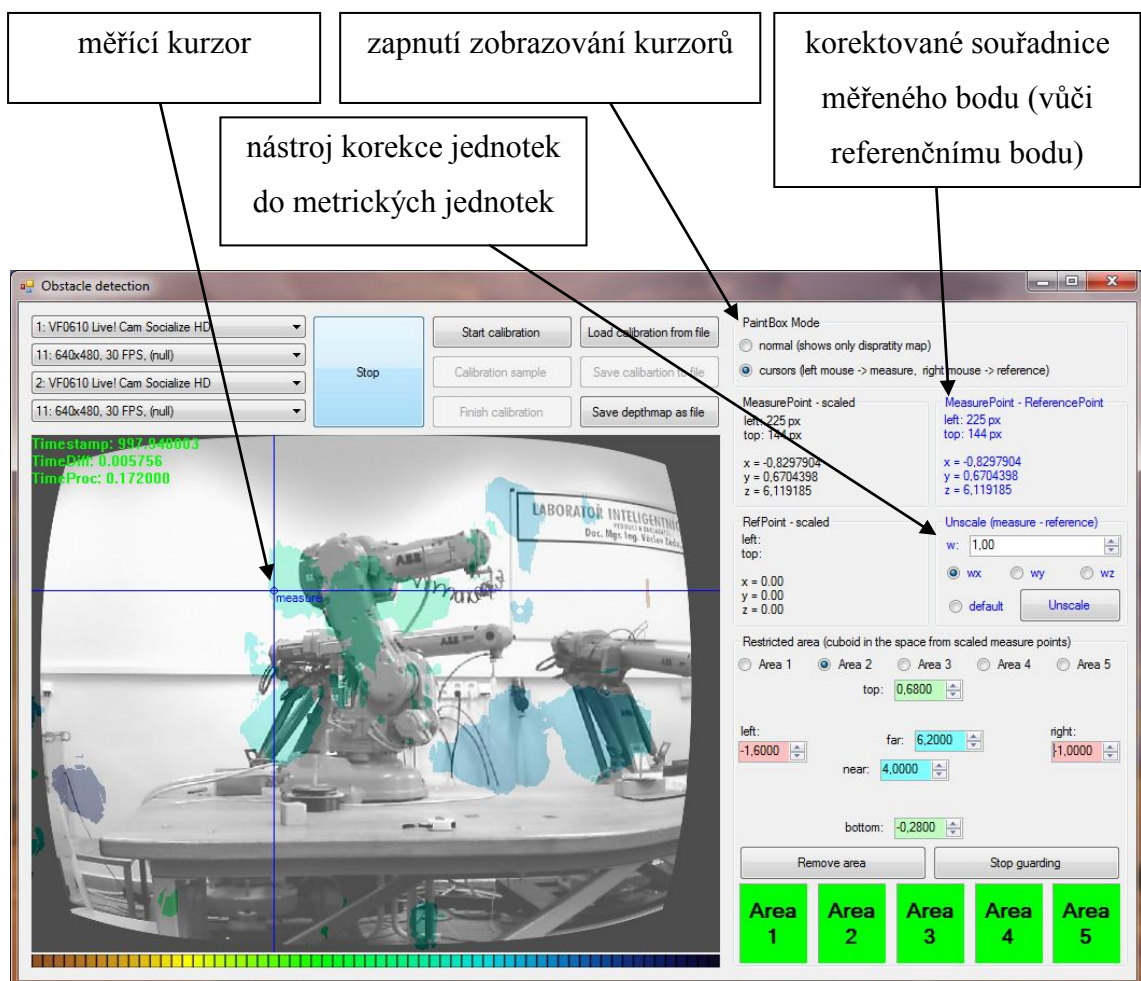
Červená barva je rezervována z důvodu jejího využití, pro vyznačení překážky na zobrazovacím plátně.

## 2.2.5 Reprojekce 3D prostoru

Informace o souřadnicích objektu v prostoru světa lze v aplikaci získat pomocí kurzorů. Pro práci s kurzory musí být přepnut režim zobrazovacího plátna.

V aplikaci jsou rozlišovány dva typy kurzoru (viz obr. 20):

- referenční kurzor – definuje referenční bod
- měřicí kurzor – zobrazuje pozici objektu v souřadném systému vztaženého k referenčnímu bodu



Obrázek 20: GUI – kurzory, korekce jednotek



## Korekce jednotek do metrických jednotek

V programu je korekce řešena tak, že uživatel označí referenční a měřený bod u známého předmětu s definovanou velikostí. Uživatel má možnost provést korekci pomocí libovolné osy.

Jednotky délky lze volit libovolně (např. metry, centimetry, atd.).

Korekce je dána vztahy:

$$W = \frac{\text{známý rozměr [mm, cm, m, inch, ...]}}{\text{vypočtený rozměr [-]}}, \quad (11)$$

$$X = X' W, \quad (12)$$

$$Y = Y' W, \quad (13)$$

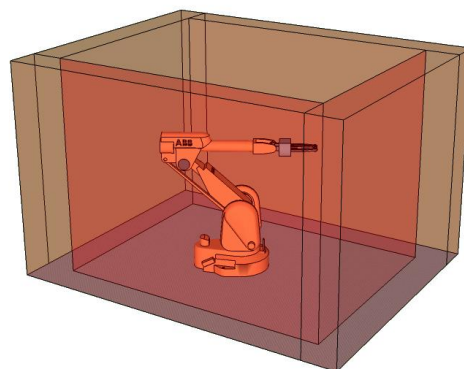
$$Z = Z' W, \quad (14)$$

kde  $W$  je korekční faktor,  $(X, Y, Z)$  jsou souřadnice bodu v jednotkách délky a  $(X', Y', Z')$  jsou souřadnice bodu v nespecifikovaných jednotkách délky.

## 2.3 Detekce objektů v prostoru

### 2.3.1 Vymezení pracovního prostoru robota

Pracovní prostor robota je takový prostor, ve kterém se robot může vyskytovat jakoukoli svojí částí. Obecně se v něm nesmí vyskytovat žádná neznámá překážka. Mohlo by dojít ke kolizi.

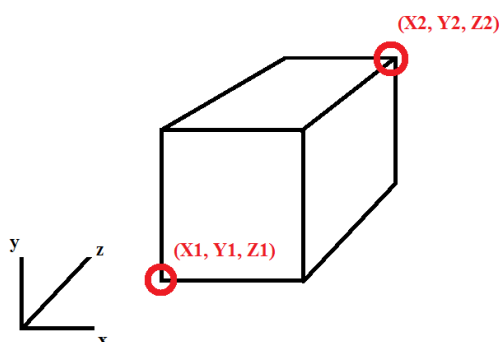


Obrázek 21: a) Robotická buňka (bezpečnostní klec), b) Virtuální bezpečnostní klec

### 2.3.2 Hlídané oblasti

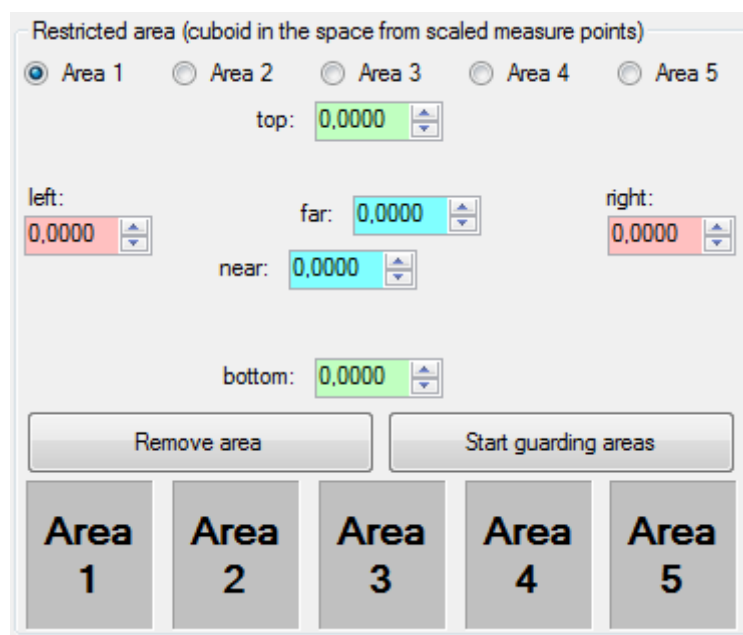
Hlídané oblasti v třírozměrném prostoru světa můžeme volit obecně libovolného tvaru. Libovolný tvar lze problematicky obecně popsat. Proto se obecné oblasti skládají pomocí elementárních oblastí, které lze sjednocovat. Díky této skutečnosti lze vytvořit libovolný tvar hlídané oblasti. Pracovní prostor robota lze hlídat pomocí čtyř elementárních oblastí (viz obr. 21b).

**Elementární oblasti** jsou voleny oblasti kvádrové tvaru. Ty lze v prostoru světa popsat pomocí dvojice vhodně zvolených 3D bodů za předpokladu, že příslušné stěny jsou rovnoběžné s příslušnými osami souřadného systému.



Obrázek 22: Kvádr v prostoru světa

V aplikaci se pomocí dvou vhodně zvolených bodů (červeně zvýrazněny na obr. 23) v prostoru světa definuje hlídaná oblast.



Obrázek 23: GUI – zadávání hlídaných oblastí

Shoda parametrů z obr. 22 a obr. 23 je zajištěna pomocí vztahů:

$$left = X1, \quad (15)$$

$$bottom = Y1, \quad (16)$$

$$near = Z1, \quad (17)$$

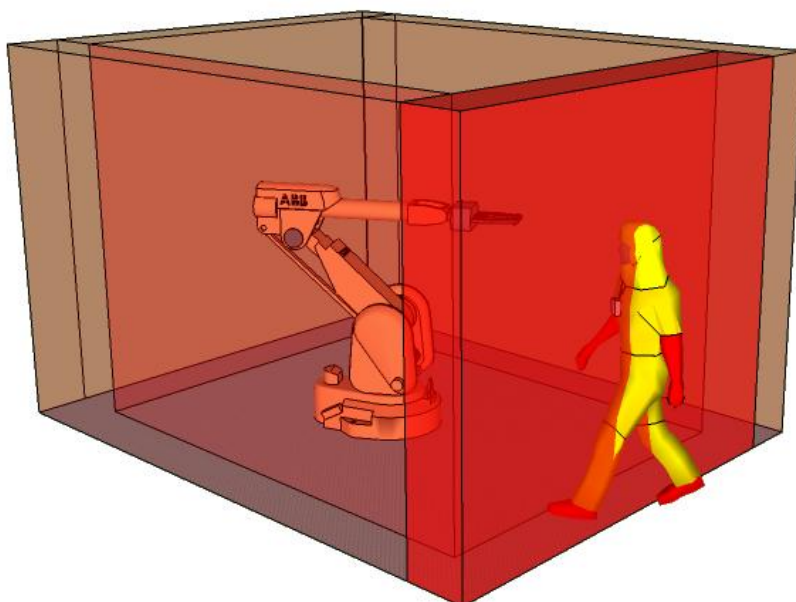
$$right = X2, \quad (18)$$

$$top = Y2, \quad (19)$$

$$far = Z2. \quad (20)$$

### 2.3.3 Detekce překážky v hlídané oblasti

Detekce překážky v aplikaci je řešena v několika úrovních.



Obrázek 24: Detekce překážky ve virtuální kleci

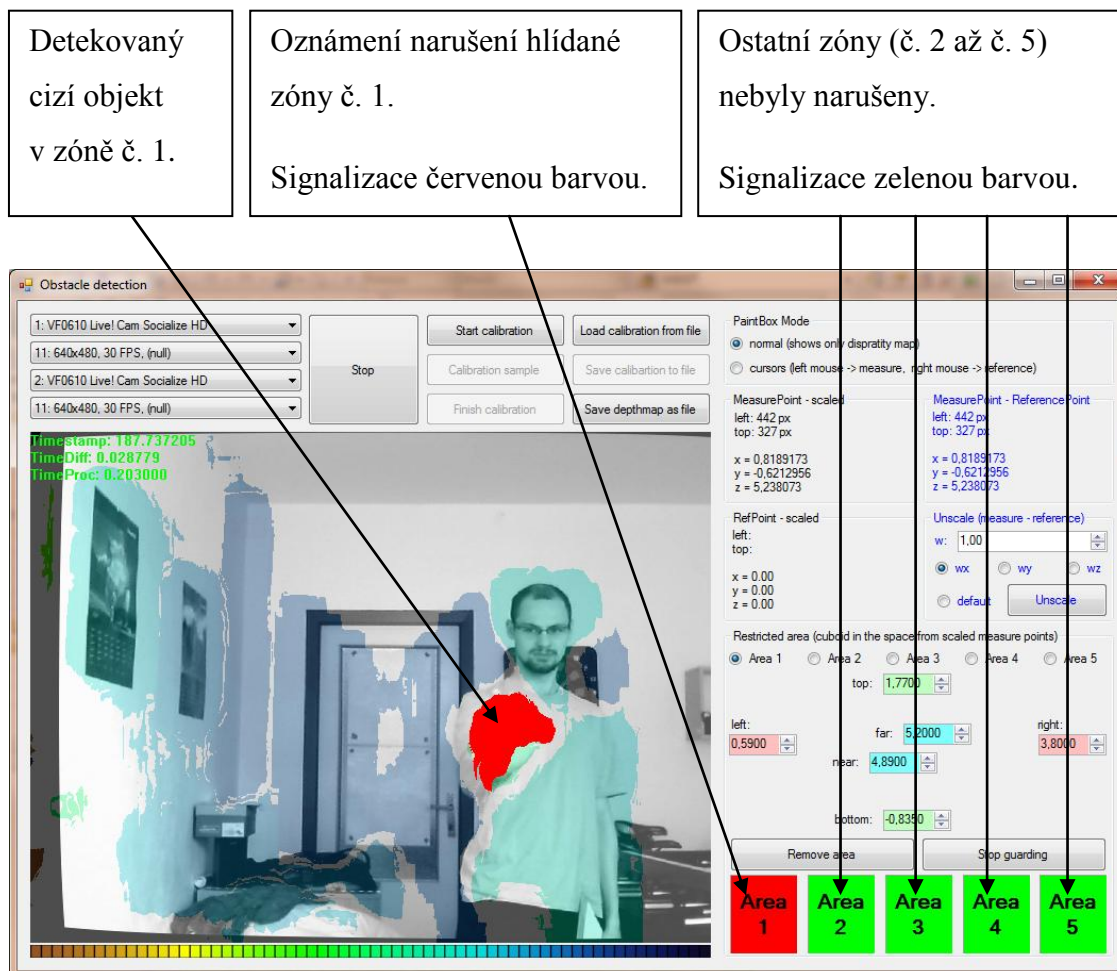
V okamžiku zjištění předmětu v hlídané oblasti, se vyvolá se událost v neřízené části programu, která slouží k rychlému zpracování, jako je např. zastavení robota.

Následně je vyvolána řízená událost, která slouží k případné úpravě prvků na formuláři.

V poslední řadě jsou do plátna, které zobrazuje snímanou scénu, zvýrazněny červenou barvou pixely, z kterých byla detekována kolize předmětu ve sledovaných oblastech (viz červené pixely na obr. 25).



Událost detekce překážky navíc obsahuje dvě informace. Zprvče informaci z kolika pixelů byla kolize detekována. Zadruhé obsahuje index hlídané oblasti, která byla narušena.



Obrázek 25: GUI – detekce překážky

Maximální počet hlídaných oblastí byl omezen. S počtem hlídaných oblastí lineárně roste výpočetní čas.

Po zjištění detekce překážky v hlídané oblasti je vhodné posoudit, ještě před vyhlášením alarmu, z kolika pixelů byla překážka detekována. Při malém počtu pixelů detekce je však možné, že detekce byla chybně vyhodnocena z důvodu špatně nalezené korespondence.

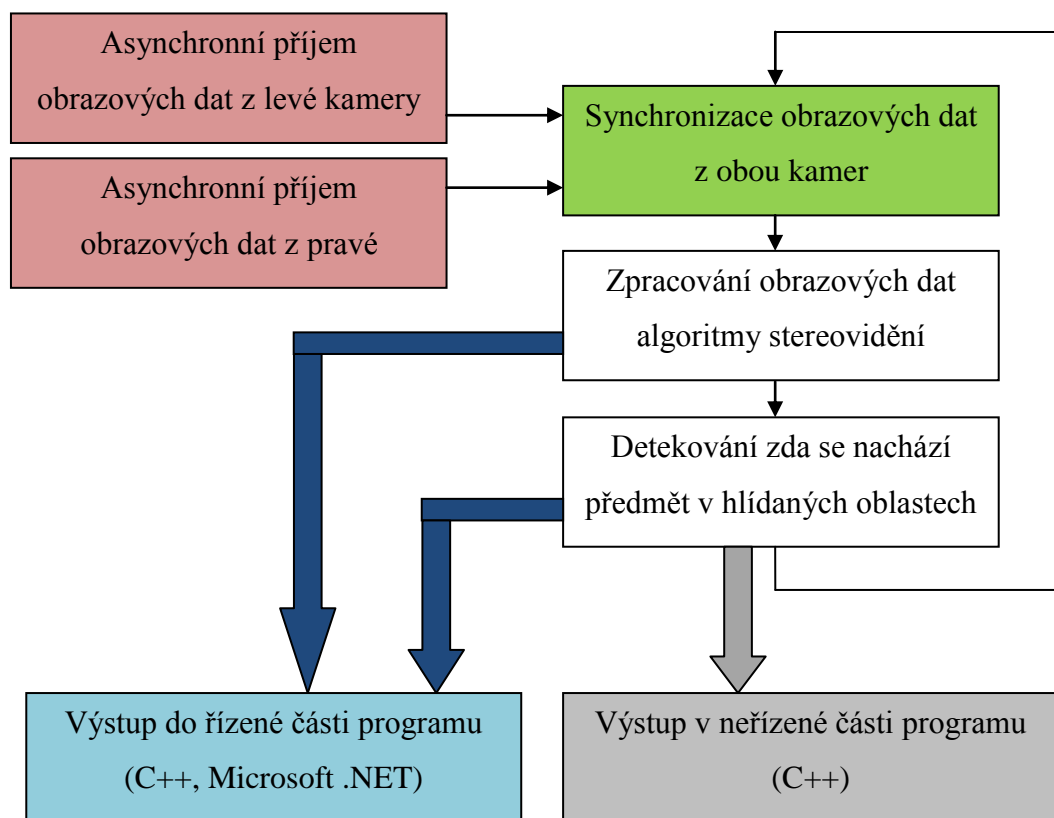
## 2.4 Snímání stereo páru snímků z kamer

V této práci se využívá algoritmů stereovidění, které vypočítávají hloubku scény využitím dvou vůči sobě posunutých kamer. Abychom mohli vyhodnotit dynamicky měnící se scénu, je zapotřebí zajistit, aby získané snímky z kamer byly pořízeny nejlépe ve stejném čase.

U statických scén nehraje důležitou roli čas pořízení dílčích snímků k vyhodnocení scény. Důležité je však podotknout, že v případě použití osvětlení zářivkou nelze dosáhnout kvalitní snímky k vyhodnocení scény v různých časech.

Kladen je důraz na to, aby snímky byly pořízeny alespoň s co nejmenší časovou vzdáleností od sebe. Proto jsou snímky z kamer získávány pomocí nízkourovňového programování, pomocí Windows API, kde je zajištěn nejrychlejší přístup k hardware.

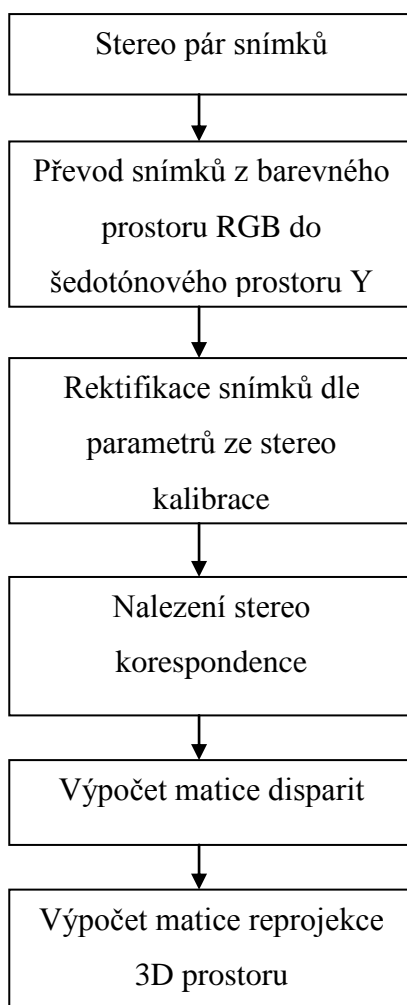
Snímky jsou pořizovány pomocí asynchronního vyzvedávání z kamer. Z důvodu snížení výpočetní náročnosti jsou snímky uloženy pouze v okamžicích, kdy neprobíhá vlastní zpracování stereo páru snímků. Z důvodu asynchronního vyzvedávání dílčích snímků musí být řešena synchronizace uložení stereo páru snímků.



Obrázek 26: Vývojový diagram synchronizace snímků

## 2.5 Zpracování stereo páru 2D snímků

Po sejmutí stereo páru snímků lze již data zpracovávat v jednom vlákně. V prvním kroku se snímky převádí z barevného prostoru do šedotónového. Tím se zmenšuje množství dat na zpracování. Následně se provede rektifikace snímků pomocí parametrů, které byly zjištěny při stereokalibraci. Po rektifikaci se použije blokového algoritmu pro získání stereokorespondence. Získáme mapu disparity, která je vztažena k rektifikovanému snímku z dominantní kamery. V poslední fázi je proveden výpočet reprojekce skutečného prostoru.



Obrázek 27 Vývojový diagram zpracování stereo páru snímků algoritmy stereovidění

### 3 Testování kamerového systému

#### Parametry testovacího počítače

Procesor:	AMD Turion(tm) II Dual-Core Mobile M500 2.20 GHz
Operační paměť:	4 GB RAM
Operační systém:	Windows 7 64bit

#### Testované páry webových kamer

Kamery Logitech:	Logitech QuickCam Orbit MP
Kamery Creative:	Creative WebCam Live!Cam Socialize HD

#### Testování z hlediska použitého hardware

Navržená aplikace byla poprvé testována s kamerami Logitech (viz obr. 28). Kamerový systém byl funkční, ale značně závislý na hloubce pozorované scény. Bylo to způsobeno tím, že kamery automaticky při zaostřování měnily svoji ohniskovou vzdálenost. Po zjištění tohoto faktu byly pořízeny webkamery nové.



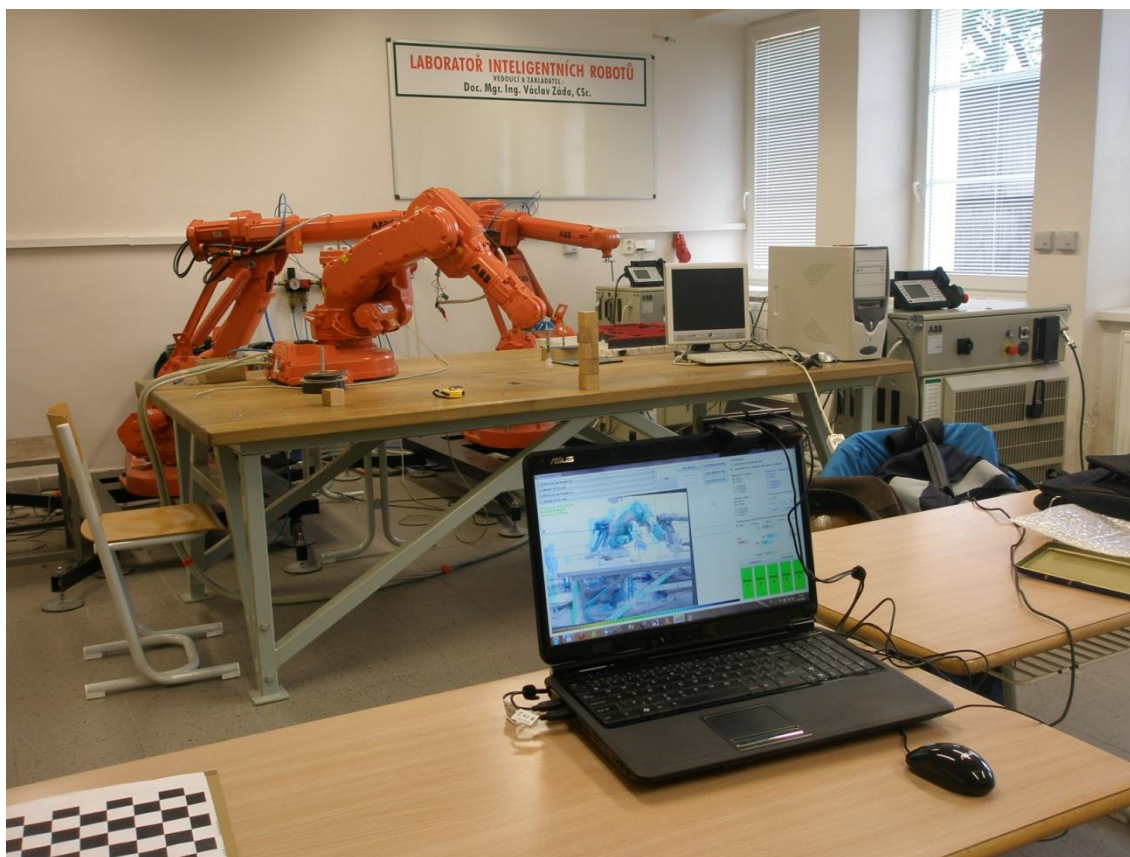
Obrázek 28: Logitech QuickCam Orbit MP

Další testování bylo s kamerami „Creative“, které mají pevnou ohniskovou vzdálenost. Použitím těchto kamer se očekávaně úspěšnost výpočtu mapy disparity zvýšila.

## Testování z hlediska prostoru místnosti a osvětlení

Testování systému bylo provedeno na několika místech za různých světelných podmínek.

Bylo zjištěno, že systém je robustní vůči změně jasu osvětlení. Současně byla zjištěna závislost na umístění světla. V laboratoři robotiky (viz obr. 29) při osvětlení zářivkou vznikalo v obraze hodně přepalů. Tím byla způsobena malá texturovanost snímku, a to mělo vliv na málo vypočtených bodů v mapě disparity.



Obrázek 29: Testování systému v laboratoři inteligentních robotů

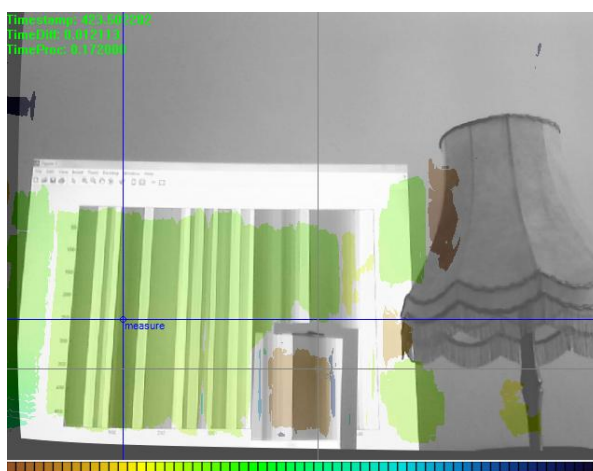
Lepších výsledků bylo dosaženo v pokoji na VŠ koleji, kde je také zářivkové osvětlení. K přepalům v obraze nedocházelo. Disparita byla vypočtena více jak u 50 % pixelů.

Průměrná doba vyhodnocení kolize objektu s hlídanou oblastí byla kolem 200 ms.

## Experiment se strukturovaným světlem

Použitá metoda stereovidění, blokového vyhodnocování, jak již bylo psáno, je velmi závislá na textuře. Snahou experimentu bylo zvýšit texturu scény za pomoci strukturovaného světla.

Zdrojem strukturovaného světla byl projektor, který promítal horizontální pruhy. Barevná struktura promítaných pruhů byla volena, tak aby po převedení do šedotónového obrazu byly jednotlivé pruhy dostatečně rozpoznatelné.



Obrázek 30: GUI – mapa disparity při použití strukturovaného světla

Výsledná mapa disparity s užitím strukturovaného světla se očekávaně zvýšila.

<b>MeasurePoint - scaled</b> left: 125 px top: 329 px  x = -1,641718 y = -0,6921958 z = 6,312147	<b>MeasurePoint - ReferencePoint</b> left: 125 px top: 329 px  x = -0,6311591 y = 0,0559704 z = 0,5926797
<b>RefPoint - scaled</b> left: 334 px top: 382 px  x = -0,02440478 y = -0,8356172 z = 4,793435	<b>Unscale (measure - reference)</b> w: 0,64  <input type="radio"/> wx <input type="radio"/> wy <input checked="" type="radio"/> wz  <input type="radio"/> default <input type="button" value="Unscale"/>

Obrázek 31: GUI – zjištění polohy bodu v prostoru

Současně při experimentování byla však zjištěna velká náchylnost blokového algoritmu na vznik chyb způsobených nalezením falešné korespondence – ovlivněno opakující se texturou.

## Závěr

Práce se v teoretické části zabývala popsáním kalibrace kamery a popsáním algoritmů počítačového stereovidění. V praktické části byl řešen postup návrhu systému, který umožňuje detekovat cizí objekty v pracovním prostoru průmyslového robota v reálném čase.

Detekovat cizí objekty přímo v pracovním prostoru robota je problematické. Proto je hlídána hranice pracovního prostoru robota. Je tak možné efektivně detekovat vnikající objekt do pracovního prostoru dříve, než by došlo ke kolizi.

Výsledkem práce je počítačová aplikace, která je schopna detekovat a vyhodnotit vniknutí objektu do přesně definované oblasti obklopující pracovní prostor průmyslového robota. Sledovaná oblast se popisuje pomocí navržených elementárních oblastí, které lze libovolně sjednocovat. Je tak možné popsat libovolně složitý prostor. Elementární oblasti jsou definovány dvojicí vhodně zvolených bodů.

Realizovaná aplikace využívá matematického frameworku OpenCV pro počítačové zpracování obrazu, zejména algoritmů pro stereovidění. Aplikace je realizována ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2008. Výpočetně náročná část je psána v programovacím jazyce C++. Formulářová část aplikace je psána v C++, Microsoft .NET.

Testováním navrženého systému bylo ověřeno, že navržená aplikace v reálném čase úspěšně detekuje objekty vnikající do pracovního prostoru robota. Systém je částečně nezávislý na měnících se světelných podmínkách. Bylo zjištěno, že použitý algoritmus hledání stereokorespondence je značně závislý na textuře ve scéně. Zároveň byl proveden experiment, který umělým zvýšením textury pomocí strukturovaného světla očekávaně zvýšil úspěšnost použitého algoritmu hledání stereokorespondence.

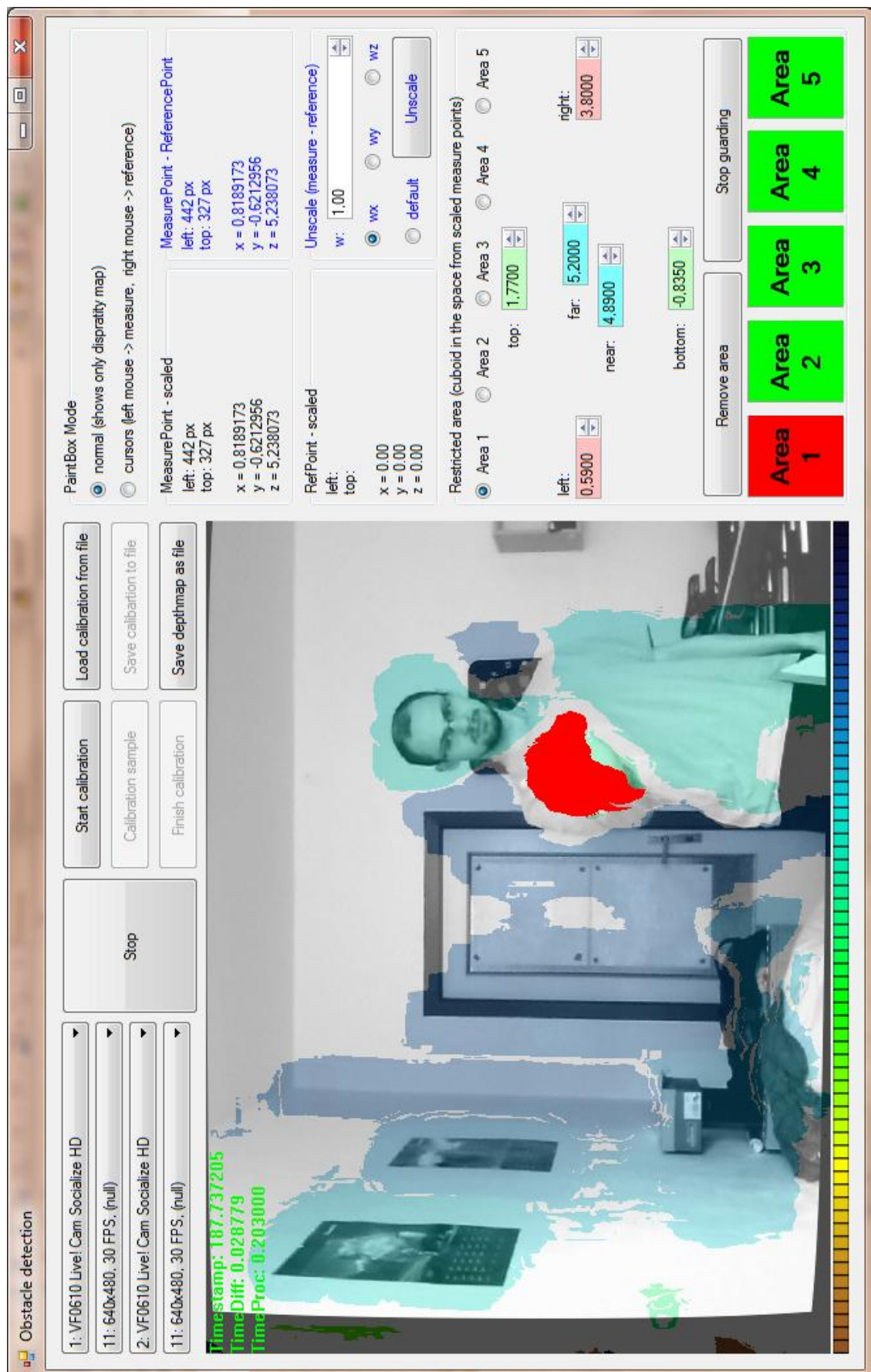
Pro další pokračování v práci bych doporučil zkoumat vliv vzájemné polohy kamer na přesnost vyhodnocení polohy objektů v prostoru snímané scény. Dále by mohlo být přínosné navrhnout efektivnější způsob pro zadávání hlídaných oblastí.

## Seznam použité literatury

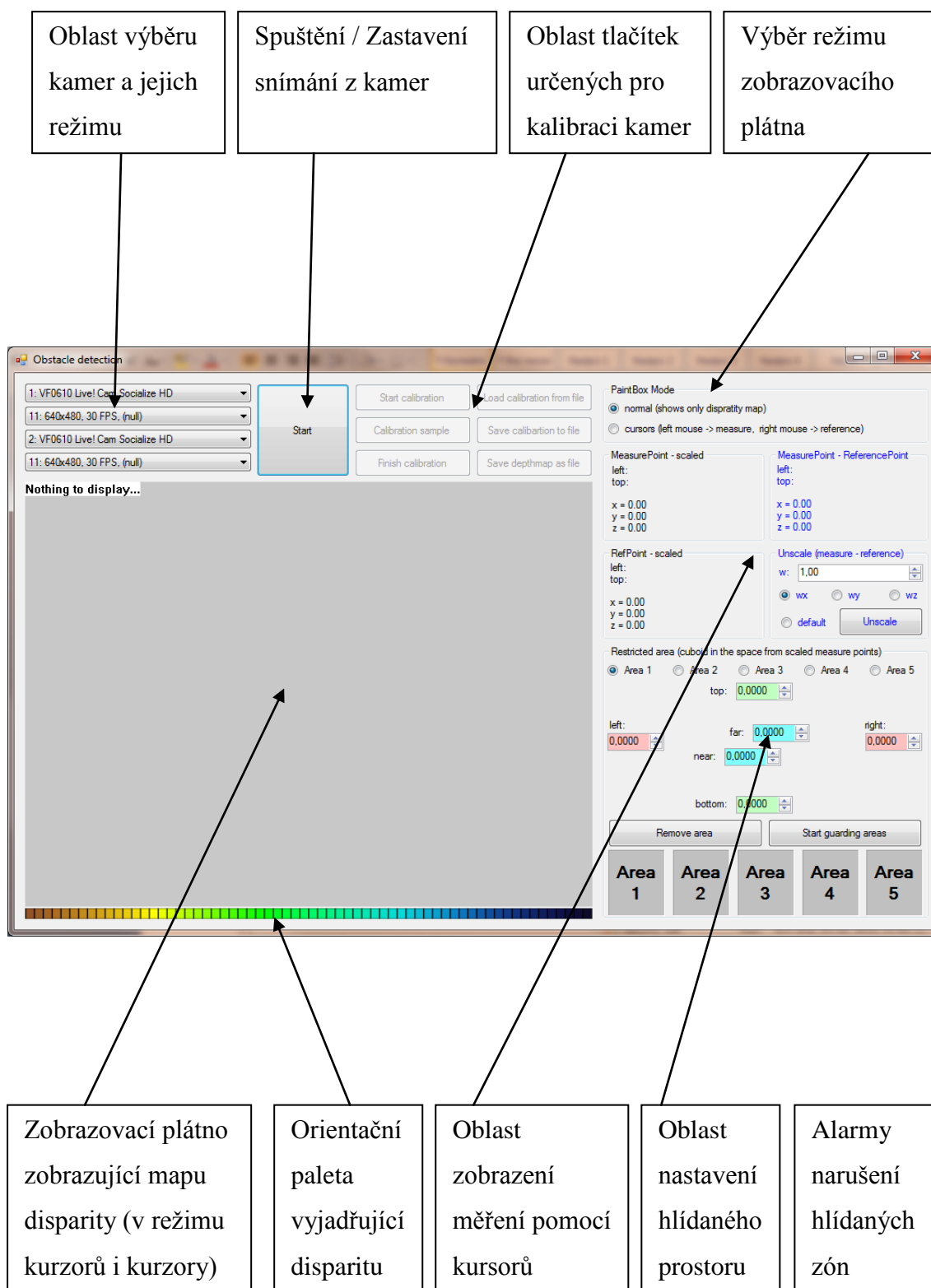
- [1] Bradski, G. Kaehler, A. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media Inc., 2008. ISBN 978-0-596-51613-0.
- [2] Hartley, R. Zisserman, A. *Multiple View Geometry in computer vision*. Cambridge University Press. ISBN 0-521-54051-8.
- [3] Ramani, D. *Camera Calibration* [online] [cit. 10. 3. 2010]  
URL: <<http://www.umiacs.umd.edu/~ramani/cmsc828d/lecture9.pdf>>
- [4] Říha, K. Hujka, P. *Epipolární geometrie* [online] [cit. 10. 3. 2010].  
URL: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/05017/index.html>>
- [5] Štilec, J. *Využití počítačového vidění v robotice*. Disertační práce. TUL, 2008.
- [6] Vořáčková, Š. *Aplikace epipolární geometrie*. [online] [cit. 10. 3. 2010]  
24. konference o geometrii a počítačové grafice.  
URL: <<http://www.fd.cvut.cz/personal/voracsar/epipolar.pdf>>
- [7] *MSDN dokumentace* [online] [cit. 10. 3. 2010].  
URL: <<http://www.microsoft.com/cze/msdn>>
- [8] *OpenCV 2.1 C++ Reference* [online] [cit. 10. 3. 2010].  
URL: <<http://opencv.willowgarage.com/documentation/cpp>>



## Příloha A – GUI navržené aplikace



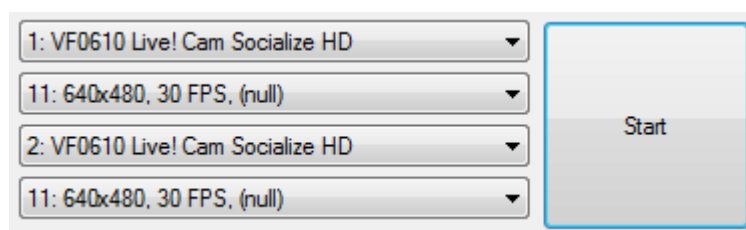
## Příloha B – Popis GUI navržené aplikace



## Příloha C – Návod na používání aplikace

### 1) Výběr kamer a jejich režimů, spuštění snímání

Prvním krokem v používání aplikace je výběr kamer a jejich režimů. Režim kamer musí být nastaven tak, aby kamery byly spuštěny ve shodném rozlišení.

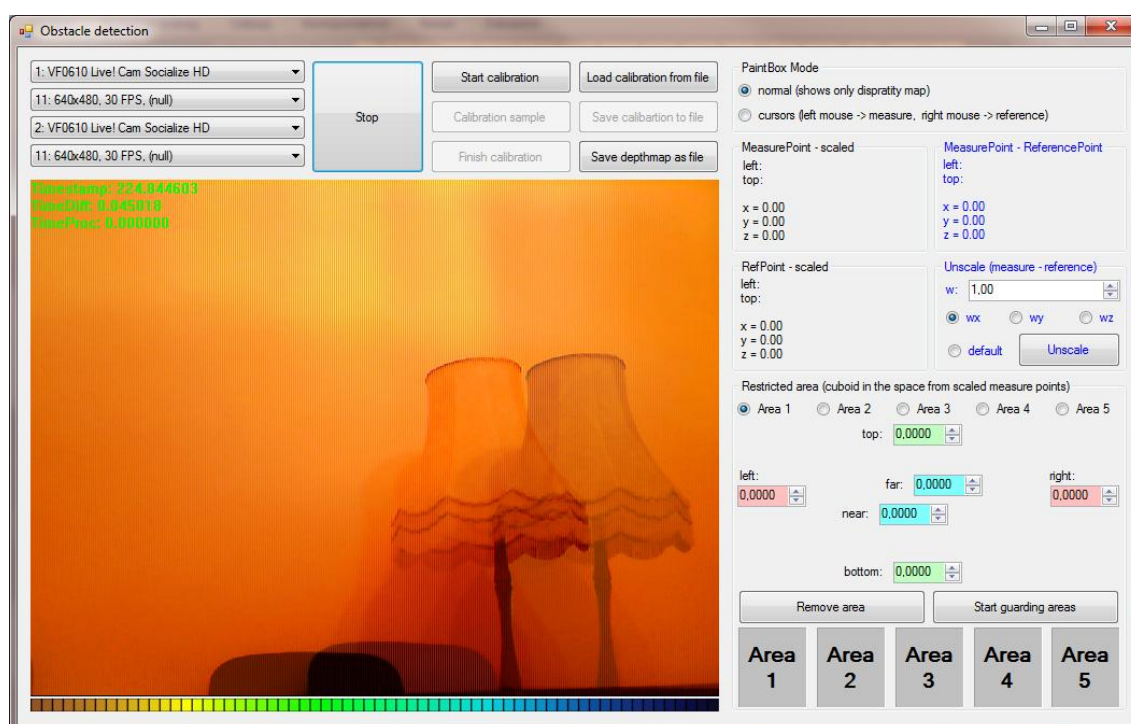


Obrázek C.1: Oblast výběru kamer a režimů

### 2) Spuštění kalibrace a dosažení horizontální shody pohledů kamer

V druhém kroku, když máme spuštěnou kalibraci kamer, je vhodné kamery seřadit tak, aby kamery v nekonečnu sledovali stejný objekt.

Obraz na zobrazovacím plátně je výsledek sloučení obrazu z levé a pravé kamery. Pomocí toho lze snadno zajistit požadavek sledování stejné scény v nekonečnu.

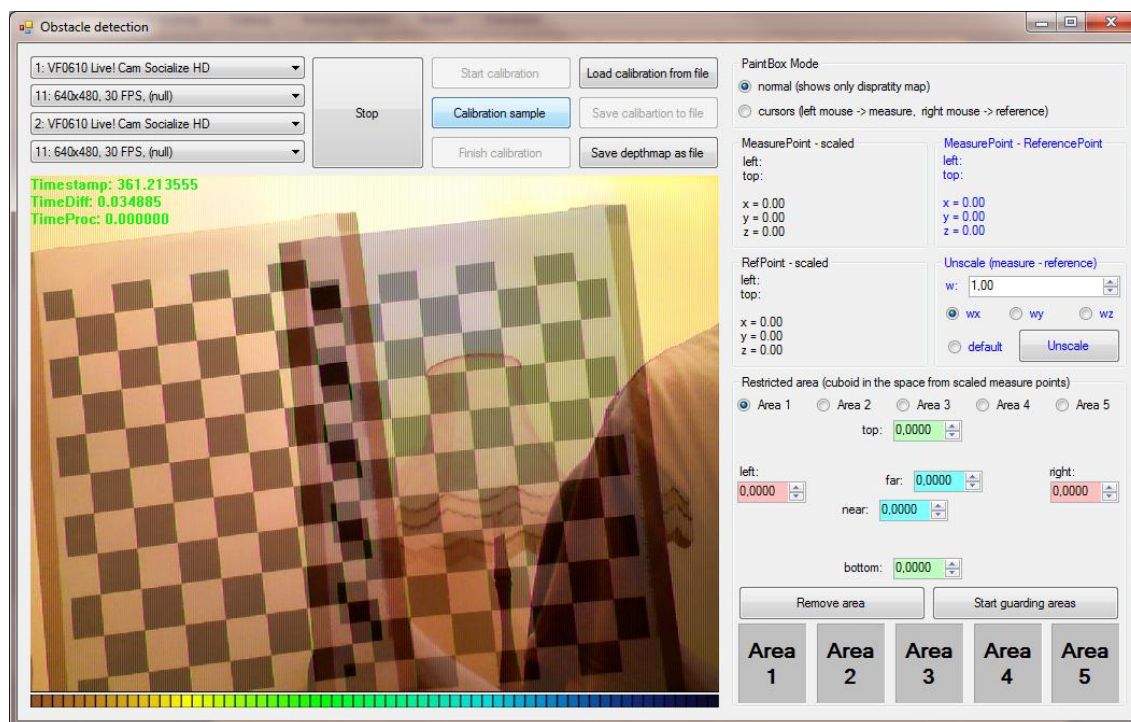


Obrázek C.2: Aplikace v režimu kalibrace – seřízení horizontální shody

### 3) Sejmutí kalibračních vzorků (šachovnice 10x7 v různých rovinách)

Třetím krokem je zkalibrování kamer pomocí stereokalibrace. Minimálně se musí úspěšně sejmout dva kalibrační vzorky.

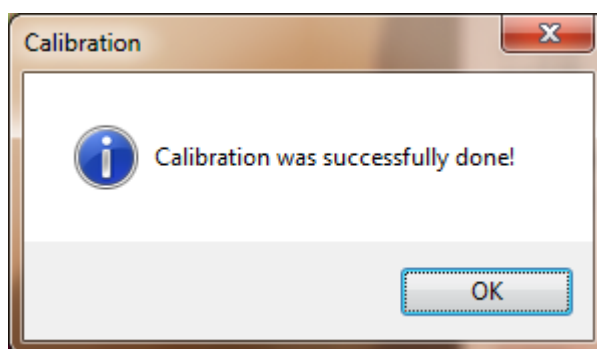
Aplikace průběžně informuje, zda kalibrační vzorky jsou použitelné – zda byly detekovány kontrolní body kalibrační šachovnice.



Obrázek C.3: Aplikace v režimu kalibrace – snímání kalibrační šachovnice

### 4) Dokončení kalibrace

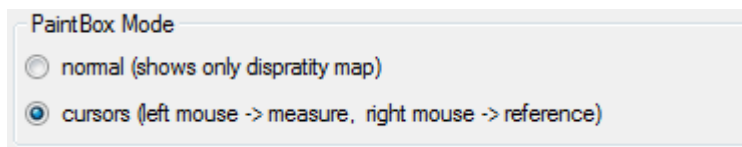
Po úspěšném dokončení kalibrace je uživatel informován dialogovým oknem. Pokud uživatel uzná za vhodné může si kalibraci uložit do souboru. Při dalším spuštění aplikace tím bude moc předejit zdlouhavému kalibrování.



Obrázek C.4: Informační dialog o úspěšném provedení kalibrace

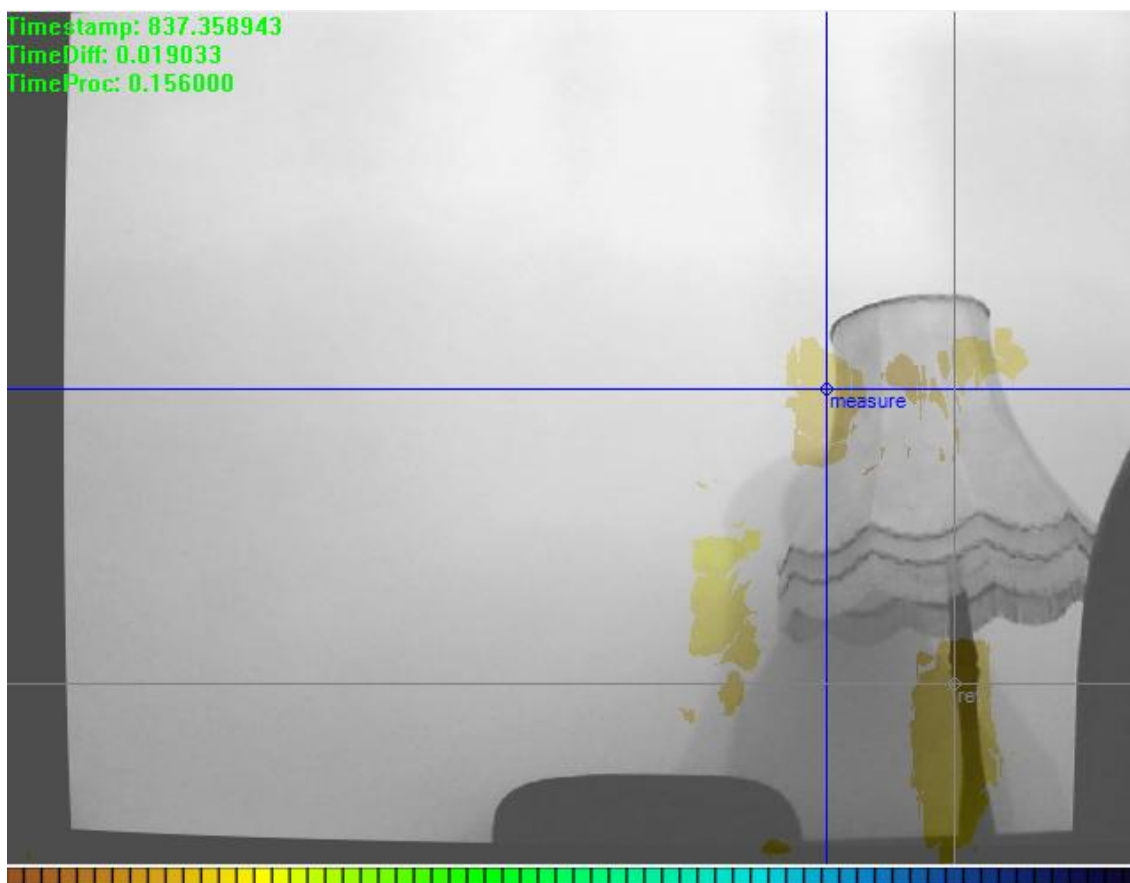
## 5) Výběr režimu zobrazovacího plátna

Zobrazovací plátno, kde je zobrazena mapa disparity, umí pracovat ve dvou režimech. Zaprvé režim prosté disparity. Zadruhé režim kurzorů.



Obrázek C.5: Oblast výběru režimu plátna

Po aktivování režimu kurzorů lze prostřednictvím zobrazovacího plátna měřit polohu bodů v prostoru světa. Měřit lze pouze body u kterých byla vypočtena disparita.



Obrázek C.6: Zobrazovací plátno s aktivovanými kurzory

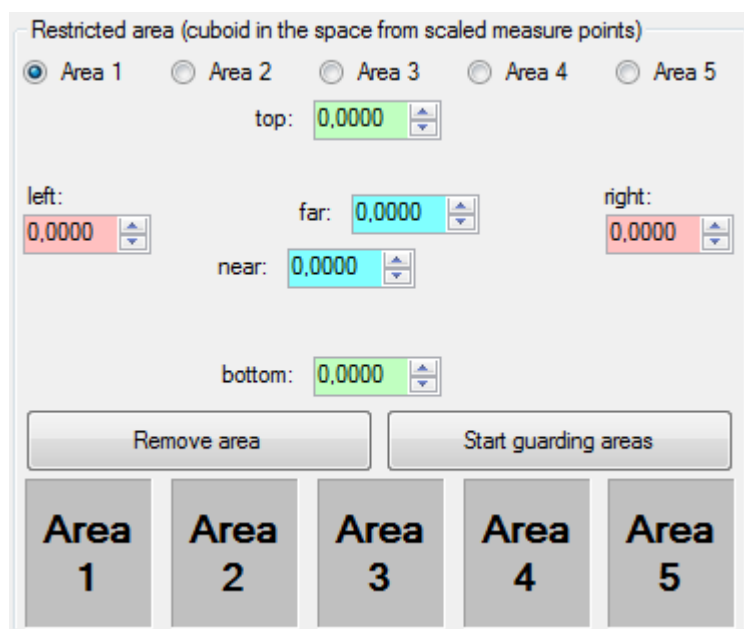
### Režim kurzorů:

Při stisku pravého tlačítka myši na zobrazovací plátno se aktivuje tzv. referenční kurzor, který definuje tzv. referenční bod. Při stisku levého tlačítka myši se aktivuje tzv. měřící kurzor.



## 6) Zadání sledovaného prostoru a spuštění hlídání

Sledovaný prostor je definován pomocí elementárních (kvádrových) oblastí. V oblasti programu „Restricted area“ lze nastavit 5 oblastí, které budou hlídány. Parametry elementárních oblastí se zjišťují pomocí měřicího kurzoru.



Obrázek C.7: Oblast definování hlídáných oblastí

Po aktivování hlídání se alarmy přepnou do signalizačního stavu. Pokud se ve sledovaných oblastech nevyskytuje žádný objekt, alarmy svítí zeleně. Naopak při detekci objektu ve sledované oblasti alarm zčervená.



Obrázek C.8: Signalizační alarmy detekce překážky

## 7) Korekce jednotek

V oblasti programu „Unscale“ lze provést korekce jednotek. Z nedefinovaných jednotek lze přejít na metrické jednotky.

Pro korekci se musí označit známý rozměr pomocí referenčního a měřicího kurzoru. Následně zadat skutečný rozměr. Vybrat na jaké ose byl rozměr měřen (x, y, z) a potvrdit.